

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



Vliv měřicí cívky proudu při měření výkonů

**The Influence of the Measuring Coil Current for Power
Measurement**

2015/2016

Kateřina Sypěnová

Zadání bakalářské práce

Student: **Kateřina Sypěnová**
Studijní program: **B2649 Elektrotechnika**
Studijní obor: **2612R041 Řídicí a informační systémy**
Téma: **Vliv měřicí cívky proudu při měření výkonů**
The Influence of the Measuring Coil Current for Power Measurement
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

Cíl práce: Proměřit vliv měřicí cívky proudu, kterou protéká neharmonický proud, při měření výkonů na hladině nn. Porovnat výsledky s přímým měřením proudu, resp. výkonu.

Body zadání:

1. Provedení rozboru vlivu měřicí cívky pro měření proudu při měření harmonických i neharmonických proudů.
2. Definování vlastností použitých, případně používaných přístrojů pro přímé i nepřímé měření proudu a výkonu.
3. Návrh postupu měření a testy pro zjištění vlivu měřicí cívky.
4. Vyhodnocení výsledků měření a návrh postupu pro měření s měřicí cívkou pro potlačení jejího vlivu na měření.
- 5: Zhodnocení dosažených výsledků závěrečné práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BARTUŠEK, Karel. *Měření v elektrotechnice*. 2. přeprac. a dopl. vyd. V Brně: VUTUM, 2010, 212 s. ISBN 978-80-214-4160-6.
- [2] DE LA ROSA, Francisco C. *Harmonics and power systems*. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2006, 184 s. ISBN 0-8493-3016-5.
- [3] TKOTZ, Klaus a Jiří HANDLÍŘ. *Příručka pro elektrotechnika*. 2. dopl. vyd. Praha: Europa-Sobotáles cz., 2006, 623 s. ISBN 80-86706-13-3.
- [4] ĎAĎO, Stanislav a Miloš SEDLÁČEK. *Měření aktivních elektrických veličin s neharmonickými průběhy*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 267 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Richard Velička, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala zcela samostatně. Uvedla jsem veškeré literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

V Ostravě dne: 26. Dubna 2016

.....*Sypinová*.....

Podpis studenta

Abstrakt

Cílem této práce je prozkoumání vlivu měřicí proudové cívky v obvodu při měření výkonu. Jedná se o to, zda měřicí cívka způsobuje chyby měření a zda se přímo na cívce zvětšuje proud o počet závitů, nebo při měření vzniká chyba. Pomocí různých experimentů bude zkoumán vliv měřicí proudové cívky na obvod. V případě prokázání chyb, které nejsou zanedbatelné, se budeme pomocí dalších experimentů a úprav v obvodu snažit chyby odstranit nebo minimalizovat tak, aby byly zanedbatelné. Hlavním zkoumáním u experimentu bude skutečnost, jestli proud na měřicí cívce narůstá přesně o počet závitů, nebo zde vzniká chyba.

Klíčová slova

Cívka; měřicí cívka; napětí; proud; výkon; indukčnost; harmonický průběh; neharmonický průběh; harmonická zátěž; neharmonická zátěž; frekvence; absolutní chyba; relativní chyba; počet závitů, třída přesnosti; chyba přístroje; chyba metody

Abstract

The objective of this work is investigative the influence of the measuring current inductor in the circuit for measurement of power. Within the whether measuring induction thereby measurement errors and whether measuring induction are correct measuring and on the inductor increases current about number of thread or in measuring arises the error. With the help of this experiment will be introduced as observation measuring current induction on the circuit. For content establishment errors which aren't negligible will be thanks with help other experiments and correct in circuit try the problems remove and to minimise that then will be negligible. The main investigating in experiment will be the fact, if current on measuring induction growth up about number of thread or if to arise error.

Key words

Inductor; measuring induction, voltage; current; power; inductance; harmonious course; inharmonious course; harmonious load; inharmonious load; frequency; absolute error; relative error; number of thread; the class of accuracy; the measurement error; the error of the method

Obsah

1	Úvod	8
2	Technologie cívek	9
2.1	Elektromagnetismus	9
2.2	Ampérovo pravidlo pravé ruky	9
2.3	Magnetické pole cívky protékané proudem	10
2.4	Měřicí transformátory a cívky	11
2.4.1	Měřicí transformátory proudu	11
2.4.2	Rogowskiho cívka	12
2.4.3	Klešťový ampérmetr	13
2.5	Vzduchová cívka	14
3	Výkon	15
3.1	Výpočet výkonu	15
3.2	Měření výkonu střídavého proudu	16
3.2.1	Zapojení wattmetru metodou VA	16
3.2.2	Zapojení wattmetru metodou AV	17
4	Chyby měření	18
4.1	Systematické neboli soustavné chyby měření	18
4.2	Nahodilé chyby	19
5	Zátěž v obvodu	20
5.1	Odporová zátěž	20
5.2	Kombinovaná zátěž – RL/RC zátěž	20
5.3	Neharmonická zátěž – spínaný zdroj	20
6	Použité přístroje	22
6.1	Napájecí zdroj – Hewlett Packard HP model 6834B	22
6.2	Wattmetr Yokogawa - WT210	22
6.3	Analýzátor sítě DEWE 571 firmy dewetron	23
	Praktická část	25
7	Testování zátěží	25
7.1	Odporová zátěž – žárovka	26
7.2	RC zátěž	27
7.3	Nelineární zátěž	28
8	Měření proudů v obvodu a na cívce, definice chyb	29

8.1	Měření chyb při harmonickém průběhu napětí a lineární zátěži	29
8.1.1	Měření na cívce o $N = 50$ při harmonickém průběhu napětí a lineární zátěži	29
8.1.2	Vzorce platné pro výpočet hodnot v následujících tabulkách	31
8.1.3	Měření na cívce o $N = 300$ při harmonickém průběhu napětí a lineární zátěži	37
8.2	Měření chyb při neharmonickém průběhu napětí a lineární zátěži	43
8.2.1	Měření na cívce o $N = 50$ při neharmonickém průběhu napětí a lineární zátěži	43
8.2.2	Měření na cívce o $N = 300$ při neharmonickém průběhu napětí a lineární zátěži	47
8.3	Měření chyb při harmonickém průběhu napětí a nelineární zátěži	51
8.3.1	Měření na cívce o $N = 50$ při harmonickém průběhu napětí a nelineární zátěži	51
8.3.2	Měření na cívce o $N = 300$ při harmonickém průběhu napětí a nelineární zátěži	54
9	Zhodnocení měření.....	57
9.1	Testování zátěží.....	57
9.2	Měření s harmonickým průběhem napětí a lineární zátěží.....	57
9.3	Měření s neharmonickým průběhem napětí a lineární zátěží.....	59
9.4	Měření s harmonickým průběhem napětí a nelineární zátěží.....	60
10	Závěr	61
11	Použitá literatura	62

Seznam použitých symbolů

Symbol (veličina)	Jednotky	Význam symbolu
A	-	Ampérmetr
C	F	Kondenzátor
f	Hz	Frekvence
I	A	Proud
L	H	Cívka
N		Počet závitů
P	W	Výkon
R	Ω	Rezistor
T_P	%	Třída přesnosti
U	V	Napětí
V	-	Voltmetr
W	-	Wattmetr
Δ	A	Absolutní chyba
δ	%	Relativní chyba

Seznam použitých zkratk

I_C	A	Celkový rozdíl proudů indukovaných na cívce
I_{CY}	A	Proud I_Y násobený počtem závitů
I_L	A	Skutečná hodnota proudu na cívce
I_{LRMS}	A	Průměrná hodnota efektivních hodnot proudů indukovaných na cívce
I_N	A	Proud násobený počtem závitů
I_{RMS}	A	Průměrná hodnota efektivních hodnot proudu v obvodu
I_Y	A	Proud naměřený digitálním wattmetrem (Yokogawa WT210)
U_R	V	Skutečná hodnota napětí na odporu
U_{RMS}	V	Průměrná hodnota efektivních hodnot napětí
U_Z	V	Skutečná hodnota napětí na zátěži
$P_{A/B}$	W	Vypočtený výkon, ze středních hodnot analyzačního softwaru - Dewetron
$P_{AR/BR}$	W	Rozdíl naměřeného a vypočteného výkonu
$P_{1/2}$	W	Výkon naměřený pomocí analyzačního softwaru - Dewetron

Seznam ilustrací

Obr. 2.2.1 Schéma pro určení směru indukčních silových čar, pomocí Ampérova pravidla pravé ruky	10
Obr. 2.4.1 Princip Rogowskiho cívky	12
Obr. 2.4.2 Příklad klešťového ampérmetru	13
Obr. 2.4.3 Proudový snímač – Amflex PNA-FLEX-300-45	13
Obr. 2.5.1 Vlevo - vzduchová cívka Vpravo – cívka s feromagnetickým jádrem	14
Obr. 3.2.1 Schéma pro měření výkonu střídavého proudu, metoda VA	16
Obr. 3.2.2 Schéma pro měření výkonu střídavého proudu, metoda AV	17
Obr. 4.1.1 Gaussova křivka pravděpodobnosti (určení pravděpodobnosti chyb)	19
Obr. 5.3.1 Blokové schéma spínaného zdroje	21
Obr. 6.3.1 Schéma zapojení měření: a.) s odporovou zátěží b.) s RC zátěží c.) s nelineární zátěží (Zdroj Pc).....	25
Obr. 7.1.1 Průběh proudu a napětí na odporové zátěži	26
Obr. 7.2.1 Průběh na RC zátěži	27
Obr. 7.3.1 Průběh na zátěži - Zdroj PC Autocont	28
Obr. 8.1.1 Průběh harmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 0,5\text{ A}$, $N = 50$	30
Obr. 8.1.2 Průběh harmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 1\text{ A}$, $N = 50$	30
Obr. 8.1.3 Průběh harmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 2\text{ A}$, $N = 50$	31
Obr. 8.1.4 Průběh harmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 0,5\text{ A}$, $N = 300$	37
Obr. 8.1.5 Průběh harmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 1\text{ A}$, $N = 300$	38
Obr. 8.1.6 Průběh harmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 2\text{ A}$, $N = 300$	39
Obr. 8.2.1 Průběh neharmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 1\text{ A}$, $N = 50$	43
Obr. 8.2.2 Průběh neharmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 2\text{ A}$, $N = 50$	44
Obr. 8.2.3 Průběh neharmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 1\text{ A}$, $N = 300$	47
Obr. 8.2.4 Průběh neharmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 1\text{ A}$, $N = 300$	48
Obr. 8.3.1 Průběh harmonického signálu obvodem s nelineární zátěží při $I = 1\text{ A}$, $N = 300$	51
Obr. 8.3.2 Průběh harmonického signálu obvodem s nelineární zátěží při $I = 1\text{ A}$, $N = 300$	54

Seznam tabulek

Tab. 1 Naměřené hodnoty pro odporovou zátěž	26
Tab. 2 Naměřené hodnoty pro RC zátěž	27
Tab. 3 Naměřené hodnoty pro nelineární zátěž zdroje - PC Autocont.....	28
Tab. 4 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 0,5$ A, $N = 50$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži	34
Tab. 5 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 0,5$ A, $N = 50$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži	34
Tab. 6 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 50$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži	35
Tab. 7 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 50$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži	35
Tab. 8 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 2$ A, $N = 50$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži	36
Tab. 9 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 2$ A, $N = 50$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži	36
Tab. 10 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 0,5$ A, $N = 300$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži	40
Tab. 11 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 0,5$ A, $N = 300$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži	40
Tab. 12 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 300$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži	41
Tab. 13 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 300$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži	41
Tab. 14 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 2$ A, $N = 300$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži	42
Tab. 15 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 2$ A, $N = 300$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži	42
Tab. 16 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 50$ při neharmonickém průběhu a lineární zátěži	45
Tab. 17 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 50$ při neharmonickém průběhu a lineární zátěži	45
Tab. 18 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 2$ A, $N = 50$ při neharmonickém průběhu a lineární zátěži	46
Tab. 19 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 2$ A, $N = 50$ při neharmonickém průběhu a lineární zátěži	46
Tab. 20 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 300$ při neharmonickém průběhu a lineární zátěži	49
Tab. 21 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 300$ při neharmonickém průběhu a lineární zátěži	49
Tab. 22 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 2$ A, $N = 300$ při neharmonickém průběhu a lineární zátěži	50

Tab. 23 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 2$ A, $N = 300$ při neharmonickém průběhu a lineární zátěži	50
Tab. 24 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 50$ při harmonickém průběhu a nelineární zátěži – Ustálený chod PC.....	53
Tab. 25 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 50$ při harmonickém průběhu a nelineární zátěži – Ustálený chod PC.....	53
Tab. 26 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 300$ při harmonickém průběhu a nelineární zátěži – Ustálený chod PC	55
Tab. 27 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 300$ při harmonickém průběhu a nelineární zátěži – Ustálený chod PC.....	55
Tab. 28 Porovnání chyb s vypočtenou relativní chybou přístroje, při harmonickém průběhu a lineární zátěži	58
Tab. 29 Tabulka rozsahů pro výpočty relativních chyb	59
Tab. 30 Porovnání chyb s vypočtenou relativní chybou přístroje, při neharmonickém průběhu a lineární zátěži	59
Tab. 31 Porovnání chyb s vypočtenou relativní chybou přístroje, při měření s harmonickým průběhem a nelineární zátěží.....	60

1 Úvod

Cívky jsou jedny z nejpoužívanějších součástí v obvodech, používají se samostatně anebo například v transformátorech. Jako každá součástka i cívka má určitý vliv na měření. Standardní vlivy jsou známé a v měření s nimi počítáme. Jsou však i méně známé okolnosti, které mohou ovlivnit měření pomocí proudové cívky? Zajímá nás tedy, jaké další vlastnosti měřicí proudové cívky ovlivňují měření výkonu a měření přímo na proudové cívce.

Mezi základní chyby patří umístění cívky v obvodu, nebo také umístění měřicího ústrojí. Měření může ovlivňovat i fázový posuv. Tyto vlastnosti jsou známé a lze je zanedbat. Do základních chyb také řadíme chyby rozsahů, se kterými musíme počítat při určování třídy přesnosti.

Jako hlavní vlastnost budeme zkoumat, zda je proud na cívce větší o počet závitů, oproti procházejícímu proudu v obvodu. Bude-li obvodem procházet proud o velikosti $I = 2 \text{ A}$, a má-li cívka počet závitů $N = 50$, tak výsledný proud indukovaný na cívce by měl být roven $I = 100 \text{ A}$. Účelem měření je zjistit, zda je proud skutečně roven této hodnotě, nebo zda se při měření objevují chyby, které ovlivní výsledný indukovaný proud.

V případě 50 závitů na cívce musí být daný proud na cívce 50x větší než proud procházející obvodem. Jestliže tato skutečnost není pravdivá, budeme zkoumat čím je tato skutečnost způsobena. Způsobí větší počet závitů větší odchylku v měření na proudové cívce? V experimentu bude pracováno s cívkou o 50 a 300 závitech. Zde by mohla být chyba způsobena umístěním cívky, očekáváme však minimální rozdíl způsobený polohou proudové cívky. Chybu na proudové cívce předpokládáme. Cílem experimentu je zjistit jak moc se reálná hodnota liší od vypočtené a zda lze tyto chyby eliminovat. V případě, že chyby nebude možné odstranit, bude nejvhodnější zjistit, jak velká je chyba v procentech, a zda lze tyto chyby zanedbat, či je alespoň minimalizovat. Samozřejmostí je zkoumání těchto chyb s různými zátěžemi. Chyba může být též ovlivněna různými typy zátěží, proto bude také zjišťováno, zda jsou chyby větší, stejné nebo menší při různých zátěžích. Velikost chyby může být také zkrešlena měřicím přístrojem, proto musíme dbát na měřicí rozsah a třídu přesnosti přístrojů.

Cílem experimentu je určit velikost chyb způsobených proudovou cívkou, při měření výkonu a při měření na samotné proudové cívce. Při výskytu chyb se pokusíme nalézt řešení k následnému odstranění nebo alespoň minimalizování.

2 Technologie cívek

Cívky jsou tvořeny navinutím z měděného vodiče nebo jiného vodivého materiálu. Za hlavní vlastnost můžeme považovat indukčnost cívky, která je závislá na uspořádání závitů a na jejich počtu. Cívky jsou vyráběny pro běžné účely jako například tlumivky, transformátory, snímače proudu (tzv. Rogovského cívky) a další. Dalším typem jsou cívky pro speciální aplikace, jako například měřicí cívky. Lze je rozdělit dle jiných kritérií a to na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční, nebo také na cívky s jádrem a cívky bez jádra (vzduchové).

2.1 Elektromagnetismus

Silové účinky magnetického pole kolem vodiče protékaného proudem jsou na určité indukční čáře stejné a jsou přímo úměrné proudu a nepřímo úměrné délce indukční čáry, jsou tedy přímo úměrné intenzitě magnetického pole.

$$H = I/(2\pi r) \quad (1)$$

Kde je: r Poloměr kruhové indukční čáry.

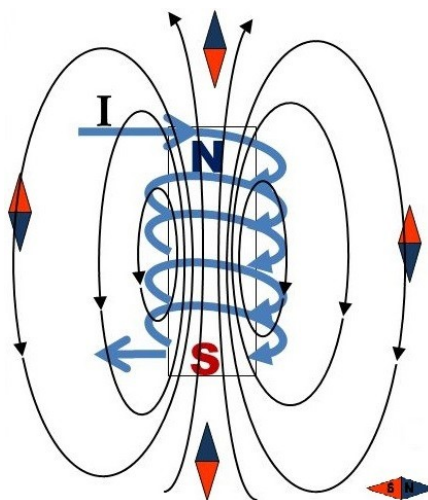
Uvedený vztah se nazývá Biot-Savartův zákon a platí obecně pro účinky pohybujících se elektrických nábojů, např. pro elektronový paprsek nebo blesk. Protéká-li vodičem střídavý proud, vytváří střídavé magnetické pole.[3]

Základní vlastnosti elektromagnetického pole:

- Kolem každého pohybujícího se elektrického náboje vzniká magnetické pole (kolem každého nepohybujícího se elektrického náboje vzniká elektrické pole).
- Kolem vodiče protékaného proudem vzniká magnetické pole.
- Magnetické indukční čáry kolem pohybujícího se náboje (nebo vodiče) mají tvar soustředných kružnic.
- Orientace indukčních čar je závislá na orientaci proudu.
- Silové účinky magnetického pole vodiče klesají se vzdáleností od vodiče.
- Elektrický proud vytváří magnetické pole (stejně jako permanentní magnet).[3]

2.2 Ampérovo pravidlo pravé ruky

Toto pravidlo nám usnadňuje definování směru a orientaci magnetických indukčních čar, při průchodu proudu vodičem v našem případě cívkou. Uchopíme-li vodič do pravé ruky, tak aby palec ukazoval směr proudu tekoucím vodičem, ohnuté prsty nám ukazují směr a orientaci magnetických indukčních čar. Toto pravidlo se dá následně převést i na cívku. V tomto případě uchopíme cívku do pravé ruky, ale tentokrát tak, aby nám pokrčené prsty ukazovali směr proudu v závitě cívky. Ukazují-li prsty směr proudu v závitě, pak palec ukazuje na severní pól cívky. Palec také ukazuje směr průchodu indukčních čar středem cívky, neboť středem cívky prochází indukční silové čáry.



Obr. 2.2.1 Schéma pro určení směru indukčních silových čar, pomocí Ampérova pravidla pravé ruky

2.3 Magnetické pole cívky protékané proudem

Magnetické pole jednoho závitu (kruhové smyčky) je možné skládat z magnetických polí dvojic rovnoběžných malých úseků vodiče, kterými proud protéká opačnými směry. V ose závitů mají indukční čáry stejný směr a účinky jednotlivých částí závitů se zde sčítají, indukční čáry zde mají velkou hustotu. Vně závitů hustota indukčních čar s rostoucí vzdáleností klesá. K získání magnetického pole se silnějšími účinky slouží cívky složené z mnoha závitů, tvořených jedním vodičem. Cívka je tvořena vodičem navinutým do mnohozávitové šroubovice. Cívka protékaná proudem je elektromagnet. [3]

Celkové magnetické pole (magnetu nebo cívky) označujeme jako magnetický (indukční) tok (magnetu nebo cívky) a lze jej znázornit jako souhrn všech magnetických indukčních čar. Magnetický (indukční) tok se označuje jako ϕ (jako světelný tok) nebo ϕ_B pro odlišení od toku intenzity elektrického pole ϕ_E a od světelného toku ϕ . Celkový magnetický tok cívky prochází vnitřním průřezem cívky a částí tohoto průřezu prochází část celkového magnetického toku. Magnetický tok může být měřen podle silových účinků. Jednotkou magnetického (indukčního) toku je voltsekunda ($\text{Vs} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$). Speciální jednotkou je weber² (Wb). Větší (elektrický) proud vytváří větší magnetický (indukční) tok. Magnetický tok cívky protékané proudem je přímo úměrný počtu závitů cívky. [3]

Magnetomotorické napětí neboli magnetický indukční tok cívky je přímo úměrný součinu proudu I a počtu závitů N . Tato veličina charakterizující příčinu magnetického toku ϕ se nazývá magnetomotorické napětí F_m (dříve též magnetomotorická síla nebo ampérzávit E_m). Kvůli odlišení od magnetické síly F_m vyvolávané magnetickým polem je označováno jako magnetomotorické napětí θ . Magnetomotorické napětí $\theta = \text{proud } I \text{ počet závitů } N$. Je možné také říci, že cívka protékaná proudem (elektromagnet) je zdrojem magnetického toku (stejně jako trvalý magnet). K samotnému udržování magnetického pole (trvalým magnetem nebo cívkou) není potřeba energie. Magnetické pole

však umožňuje přeměnu mechanické energie na elektrickou (u generátorů) a obráceně (u elektromotorů). [3]

Intenzita účinků magnetického pole je také přímo úměrná koncentraci energie magnetického pole. Magnetické účinky jsou tím intenzivnější, čím větší je magnetomotorické napětí a čím menší je střední délka magnetické indukční čáry. Podíl magnetomotorického napětí θ a délky indukční čáry l_m cívky odpovídá veličině $H=I/(2\pi r)$ pro přímý vodič v Biot-Savartově zákonu. Tato veličina se nazývá intenzita magnetického pole. Intenzita magnetického pole je vyjádřena magnetomotorickým napětím na jednotkovou délku indukční čáry. Střední délka indukční čáry je u prstencové cívky (toroidu) stejná jako délka středního vlákna prstence. U protáhlých válcových (solenoidů) bez železného jádra (vzduchových cívek) je pole vně cívky velmi slabé a pro výpočet intenzity pole uvnitř solenoidu se počítá s délkou solenoidu jako s délkou indukční čáry. [3]

Intenzita účinků magnetického pole je také úměrná hustotě indukčních čar. Je tedy tím větší, čím větší je magnetický tok a čím menší je plocha průřezu, kterým magnetický tok prochází. Podíl magnetického toku Φ a plochy A , kterou kolmo prochází, se nazývá magnetická indukce. Označuje se B a její jednotkou je Tesla (T). Je možné ji měřit pomocí Hallovy sondy. [3]

2.4 Měřicí transformátory a cívky

Měřicí transformátory jsou používány k převodu hodnoty měřené veličiny na velikost vhodnou k měření. Také se používají ke galvanickému oddělení měřicích obvodů a přístrojů od jiných napětíových hladin, například při výrobě a rozvodu elektrické energie. [1]

Výhody měřicích transformátorů:

- Lze transformovat nejen z větší hodnoty na menší, ale i obráceně, což bočníky ani předřadné odpory neumožňují.
- Spotřeba měřicích obvodů s měřicími transformátory se nemění změnou rozsahu, zvětší se jen o ztráty v transformátoru, které jsou většinou malé.

Nevýhoda měřicích transformátorů:

- Nelze transformovat veličiny stejnosměrné nebo časově proměnné se stejnosměrnou složkou.

2.4.1 Měřicí transformátory proudu

Primární obvod měřicího transformátoru proudu (MTP) je zapojen do série se zdrojem, sekundární vinutí se připojuje k měřicímu přístroji – ampérmetru.

Transformační poměr (převod) ideálního měřicího transformátoru proudu je:

$$p_I = \frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} \quad (2)$$

Kde je: I_pPrimární proud

I_sSekundární proud

N_pPočet primárních závitů

N_sPočet sekundárních závitů

Laboratorní měřicí transformátory proudu mívají primární vinutí přepínatelné pro více rozsahů. Reálný MTP uskutečňuje převod proudů s určitou odchylkou (amplitudovou a fázovou), danou rozptylovou indukčností primárního a sekundárního vinutí transformátoru, magnetizací feromagnetického obvodu transformátoru a jeho ztrátami. Přesnost proudového transformátoru je specifikována třídou přesnosti, vyjadřující povolenou poměrnou amplitudovou odchylku proudu v %.

$$\delta_1 = \frac{p_1 I_s - I_p}{I_p} 100 \quad (3)$$

Kde je: $p_1 I_s$...Hodnota skutečného sekundárního proudu přepočítaná na primární proud.

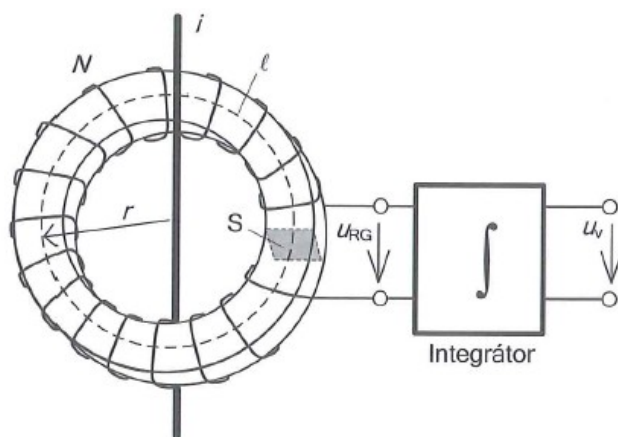
Přesnost převodu MTP závisí

- Na velikosti měřeného proudu,
- Na kmitočtu měřeného proudu,
- Na tvaru a vlastnostech jádra a vinutí
- Na velikosti a charakteru sekundární impedance.

Pro správnou funkci musí být proudové transformátory zatíženy co nejmenší impedancí, ideálně spojeny do zkratu. [1,4]

2.4.2 Rogowskiho cívka

Pro měření střídavých proudů lze kromě MTP a bočníků použít také Rogowskiho cívky (RG). RG je tvořena cívkou s N závitů navinutými na nemagnetickém jádře s průřezem S , nejčastěji ve tvaru prstence. Prstenec obepíná vodič s měřeným proudem i . [1,6]



Obr. 2.4.1 Princip Rogowskiho cívky

2.4.3 Klešťový ampérmetr

Přímé měření proudu vyžaduje rozpojení proudového obvodu a sériové zapojení ampérmetru. Při velkých proudech a napětích je tato operace složitá a nebezpečná. Často není možné z provozních důvodů proudový obvod přerušit. V praxi se používá k měření velkých proudů měřicího proudového transformátoru nebo průvlečného či klešťového ampérmetru. Tento způsob měření nevyžaduje rozpojení proudového obvodu.

Kolem vodiče, kterým prochází, vytváří střídavý proud magnetické pole, jehož indukční účinky lze využít k měření střídavého proudu. Uzavřené železné jádro tvořené sevřenými čelistmi klešťového ampérmetru je jádrem cívky ampérmetru. Cívka ampérmetru je zde sekundární cívkou měřicího transformátoru, ve které se indukuje napětí úměrné střídavému proudu ve vodiči obepnutém sevřenými čelistmi klešťového ampérmetru. Citlivost je možné zvýšit několikanásobným omotáním prstencového jádra vodičem, kterým prochází měřený proud. Klešťovým ampérmetrem s indukčním měničem lze měřit jen střídavé proudy. [3]



Obr. 2.4.2 Příklad klešťového ampérmetru

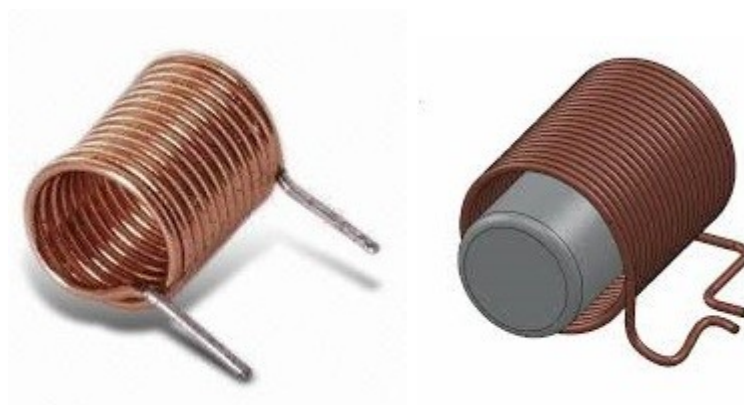
K měření proudu, bez přerušení obvodu, můžeme taktéž využít proudový snímač Amflex PNA-FLEX-300-45 Obr. 2.4.3. Tento snímač lze využít pro větší rozměry cívek. Jejich výhodou je ohebnost a rozměr. Proudový snímač je dodáván přímo k daným zařízením, nebo samostatně. Snímač Amflex lze připojit k wattmetru, multimetru či jinému odpovídajícímu zařízení.



Obr. 2.4.3 Proudový snímač – Amflex PNA-FLEX-300-45

2.5 Vzduchová cívka

Vzduchová cívka má velmi malou indukčnost ve srovnání s feromagnetickou cívkou s jádrem o stejných rozměrech. Tyto cívky bývají buď samonosné, vodič je navinut bez opory, anebo mohou být navinuty na nemagnetickém materiálu. Vzduchová cívka má lineární závislost B na H , kdežto feromagnetické cívky jsou nelineární. Dojde-li u feromagnetických cívek k přesycení, nelze dál zvětšovat proud na cívce. Naproti tomu u vzduchové cívky lze proud zvětšovat stále, neboť vzduchová cívka nemá jádro a tedy nemůže dojít k přesycení jádra. [4]



Obr. 2.5.1 Vlevo - vzduchová cívka Vpravo – cívka s feromagnetickým jádrem

3 Výkon

Výkon je fyzikální veličina, kterou můžeme definovat jako vykonanou elektrickou práci za jednotku času. Výkon lze měřit jak pro střídavé napětí, tak i pro stejnosměrné napětí. V případě stejnosměrného napětí lze výkon určit jako součin naměřených hodnot napětí a proudu, nebo pomocí wattmetrů. Střídavý výkon lze měřit pomocí elektrodynamických měřicích přístrojů. Výkon bude měřený na jednofázové síti, lze jej však měřit i na síti třífázové. [1]

3.1 Výpočet výkonu

Výkon stejnosměrného obvodu, je definován součinem napětí na spotřebiči a proudu procházejícím spotřebičem.

$$P = U \cdot I \text{ (W)} \quad (5)$$

Okamžitá hodnota výkonu časově proměnného proudu je

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \text{ (VA)} \quad (6)$$

Střední hodnota výkonu proudu za periodu je definována:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (7)$$

Kde je: uOkamžitá hodnota napětí,
 iOkamžitá hodnota proudu,

Jsou-li průběhy proudu a napětí harmonické s fázovým posuvem φ , definujeme střední hodnotu okamžitého výkonu jako činný výkon

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ (W)} \quad (8)$$

Kde je: UEfektivní hodnota napětí,
 IEfektivní hodnota proudu,
 $\cos \varphi$ Účinník.

Jalový výkon je pro harmonické signály definován

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ (var)} \quad (9)$$

Zdánlivý výkon je definován součinem efektivních hodnot proudu a napětí

$$S = U \cdot I \text{ (VA)} \quad (10)$$

Pro harmonické průběhy proudu a napětí platí tzv. trojúhelník výkonů

$$S^2 = P^2 + Q^2 \text{ (VA)} \quad (11)$$

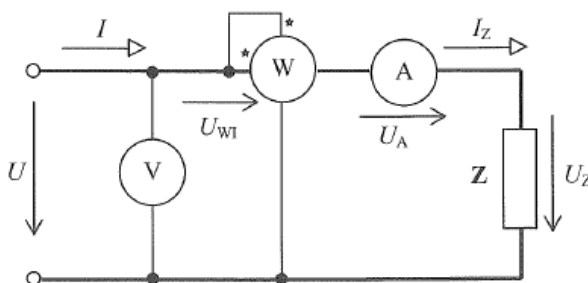
Jsou-li napětí a proud neharmonické platí nerovnost

$$S^2 > P^2 + Q^2 \text{ (VA)} \quad (12)$$

3.2 Měření výkonu střídavého proudu

Činný výkon střídavého proudu obvykle měříme wattmetry, buď analogovými s elektrodynamickým ústrojím, nebo také elektronickými. Z údaje wattmetru nepoznáme, jaký proud prochází proudovým obvodem, nebo jaké napětí je v napěťovém obvodu. Do série s proudovou cívku wattmetru musíme proto vždy připojit ampérmetr. Paralelně s napěťovou cívku wattmetru musíme zapojit voltmetr. Wattmetry můžeme zapojit dvěma způsoby, každý tento způsob je zatížen určitými chybami metody. [1,7]

3.2.1 Zapojení wattmetru metodou VA



Obr. 3.2.1 Schéma pro měření výkonu střídavého proudu, metoda VA

V zapojení VA ukazuje wattmetr činný výkon zátěže zvětšený o výkon spotřebovaný proudovou cívku wattmetru a výkon spotřebovaný ampérmetrem. Činný výkon určený z výchylky wattmetru je tedy:

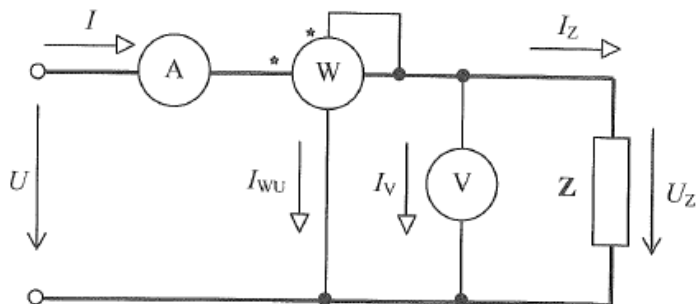
$$P_{VA} = P_Z + P_{WI} + P_A \quad (13)$$

Kde je P_Z Výkon zátěže

P_{WI} Výkon spotřebovaný proudovou cívku wattmetru,

P_A Výkon spotřebovaný ampérmetrem. [1]

3.2.2 Zapojení wattmetru metodou AV



Obr. 3.2.2 Schéma pro měření výkonu střídavého proudu, metoda AV

V tomto zapojení ukazuje wattmetr výkon spotřebovaný zátěží zvětšený o výkony spotřebované napětřovou cívkou wattmetru a voltmetrem. Wattmetr tedy ukazuje hodnotu:

$$P_{AV} = P_Z + P_{WU} + P_V \quad (14)$$

Kde je P_{WU} Výkon spotřebovaný napětřovou cívkou wattmetru,
 P_V Výkon spotřebovaný voltmetrem. [1]

4 Chyby měření

Chyby měření vznikají několika způsoby. Jako první jsou uváděny chyby náhodné, které vznikají zcela nahodile a nelze je sledovat pravidelně. Tyto chyby jsou způsobené okolními vlivy, chybami obsluhy přístroje či jinými náhodnými okolnostmi. Ve většině případů tyto chyby z měření vyloučíme, neboť ovlivňují celé měření negativním způsobem.

Mezi hlavní sledované chyby při měření, patří chyby systematické, které se v obvodu vyskytují pravidelně. Tyto chyby jsou způsobené metodou měření, ale hlavně chybami přístrojů. Systematické chyby lze sledovat a spočítat pomocí korekční křivky. Každý přístroj má určitou třídu přesnosti, která určuje, s jakou přesností přístroj měří. Podle třídy přesnosti přístroje určíme, zda je chyba způsobena měřicím rozsahem přístroje. Je-li vypočtená chyba v rámci třídy přesnosti, lze výsledky považovat za správné, jestliže měříme ve správné části rozsahu. Pro správnou definici chyb, je nutné spočítat procentuální chybu. Tato chyba je dána rozsahem měřicího přístroje. V případě měření v první části rozsahu jsou chyby zkreslené, neboť měření není přesné. Vypočteme-li pomocí rozsahu chybu až 6% v první části rozsahu, neznamená to, že chyba je v toleranci. Chyby naměřené na začátku rozsahu jsou nepřesné sami o sobě. Jeli chyba měření větší než třída přesnosti daného měřicího přístroje, je jasné, že chyba je způsobena dalšími vlivy nesouvisejícími s třídou přesnosti. Třídy přesnosti jsou dány dle normy. Údaje jsou dány v procentech: 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 5.

Přesnost měření zjišťujeme výpočtem. Z naměřených hodnot bude vypočtena absolutní chyba, která se definuje jako rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou. Skutečná hodnota může být brána jako hodnota naměřená na přesnějším přístroji.

$$\Delta = X_M - X_S (-) \quad (15)$$

Kde je: X_M Naměřená hodnota

X_S Skutečná hodnota

Pomocí absolutní chyby se vypočte relativní chyba. Relativní chyba se využívá pro určení třídy přesnosti. Pomocí třídy přesnosti lze částečně určit, zda je chyba způsobena rozsahem, třídou přesnosti přístroje, anebo je způsobena jiným vlivem. Za jiné vlivy může být považováno například měření na měřicí cílce.

$$\delta = \frac{\Delta}{X_M} \cdot 100 (\%) \quad (16)$$

Kde je: Δ Absolutní chyba

X_M Naměřená hodnota

4.1 Systematické neboli soustavné chyby měření

Je-li měření prováděno za stále stejných podmínek, stejným pozorovatelem, vznikají soustavné chyby,

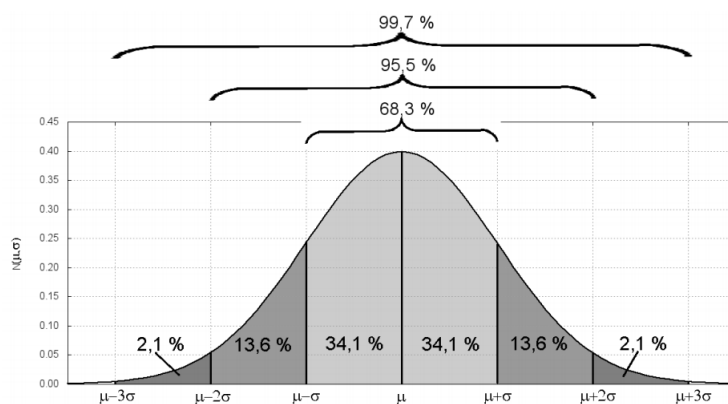
kteřé se při opakování měření nemění. Tyto chyby mají stále stejné znaménko. V určitých případech lze určit velikost soustavných chyb.

- Chyby metody

Vznikají použitím daných metod při měření a výpočtu hodnot. Mezi dané metody patří zaokrouhlování, zjednodušování výpočtů nebo úprava měřicího obvodu. Chybu metody lze snadno vyloučit pomocí korekce.

- Chyby měřicích přístrojů

Vznikají vlivem měřicích přístrojů a jejich nedokonalostmi. Tyto chyby jsou dovolené, jejich velikost udává třída přesnosti přístrojů. Chyby měřicích přístrojů nelze opravou vyloučit, můžeme však určit danou mez, v které se nachází hodnota skutečné veličiny.[8]



Obr. 4.1.1 Gaussova křivka pravděpodobnosti (určení pravděpodobnosti chyb)

4.2 Nahodilé chyby

Jsou neznámého původu a vznikají zcela nahodile. Měříme-li určitou veličinu několikrát za sebou, za stejných podmínek, nemělo by docházet k výraznému rozdílu ve výsledcích. Objeví-li se hodnota, s výrazně rozdílným výsledkem, nežli v předchozích měřeních, jedná se o chybu nahodilou. Nahodilé chyby vznikají chybou pozorovatele, nebo rušivými okolními vlivy (vlhkost, teplota, magnetické pole atd.).

- Chyba pozorovatele

Jsou způsobeny pozorovatelem, který čte a zapisuje údaje z měřicích přístrojů. Dochází tedy k lidské chybě. Dojde-li k jedné chybě mezi stovkou dalších měření, lze dané měření zanedbat.

- Chyby rušivými vlivy

Vznikají působením rušivých činitelů v měřicím obvodu a v jeho okolí. Mezi tyto činitele můžeme řadit vlivy mechanické, vlivy vlhkosti, vliv teploty nebo vliv magnetického či elektrostatického pole atd. [8]

5 Zátěž v obvodu

5.1 Odporová zátěž

Odporová zátěž se používá pro harmonické obvody. Odporovou zátěž lze použít pro jakékoliv napájecí napětí, neboť zde nedochází ani k fázovému posunu ani deformaci tvaru proudu. Proud svým tvarem odpovídá napájecímu napětí. Tato obvodová zátěž neobsahuje kapacitní ani induktivní zátěž, jedná se pouze o zátěž odporovou. Odporová zátěž může zahrnovat například elektrické ohříváče či žárovku. Pro většinu odporových zátěží platí, že mají malý zapínací proud.

Pro měření bude použita lineární halogenová žárovka o výkonu 200 W, neboť tento typ žárovky se svým charakterem velmi blíží odporové zátěži. Velkou výhodou je také možnost vizuální kontroly procházejícího proudu na základě jejího jasu.

5.2 Kombinovaná zátěž – RL/RC zátěž

Může být čistě induktivní nebo kapacitní, dále se jako neodporových zátěží využívá spojení prvků R, L, C. Tento typ zátěže bude použit při napájení harmonickým i neharmonickým napětím. Tvar napájecího napětí bude nastavován dle požadavků na napájecím zdroji. Je předpoklad, že tvar procházejícího proudu bude odpovídat napájecímu napětí s tím, že bude fázově posunut.

- **RL zátěž**

Spojením prvku R a L v soustavě dostaneme RL zátěž. Toto spojení může být provedeno buďto sériově anebo paralelně. V sériovém zapojení prochází cívkou a rezistorem stejný proud, ten je zároveň ve fázi s napětím. Cívka má vlastní odpor, který musíme brát v úvahu, chceme-li vybírat odpor odpovídající velikosti, pro propojení s cívkou. Zapojíme-li tyto prvky paralelně, jejich vzájemné ovlivňování se bude lišit v rámci imaginární soustavy.

- **RC zátěž**

V případě sériové zátěže, odpor vytváří reálnou složku, a kondenzátor vytváří imaginární složku v obvodu. Imaginární složka se mění v závislosti na velikosti kondenzátoru. Stejně jako v předchozím případě prochází danými prvky stejně velký proud, který je ve fázi s napětím. V případě paralelního zapojení neprochází prvky stejný proud, nýbrž stejné napětí. U tohoto typu zapojení má kmitočet převážně odporový charakter.

5.3 Neharmonická zátěž – spínaný zdroj

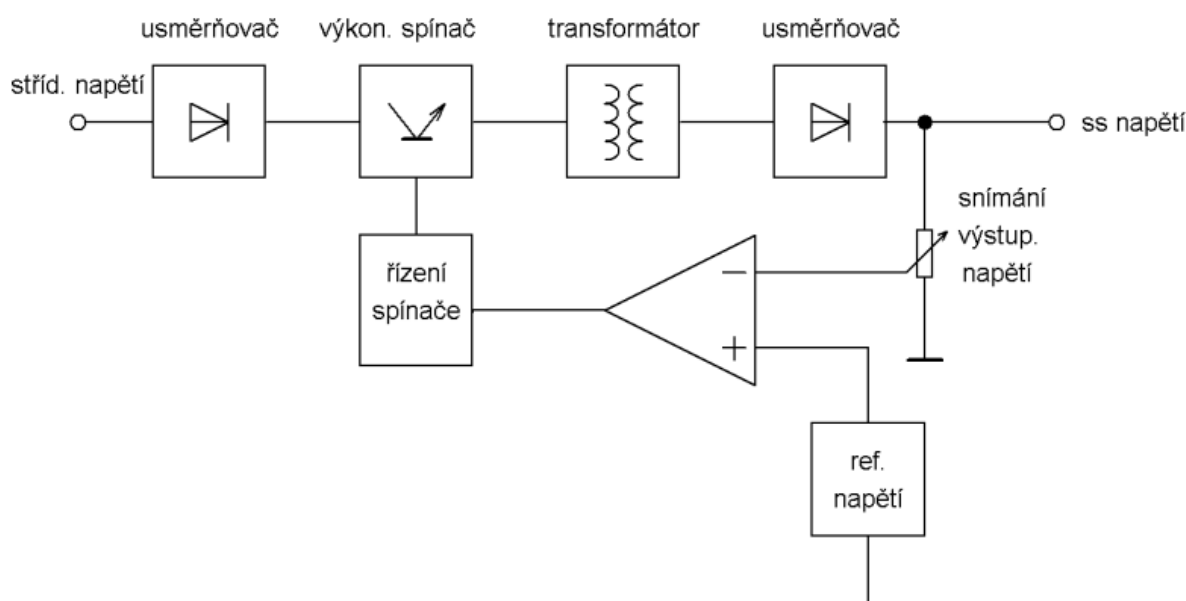
Spínaný zdroj se skládá z několika základních částí, znázorněných na obr. 5.3.1 Ne vždy obsahuje všechny prvky (např.: výstupní filtr). Spínaný zdroj může obsahovat i některé prvky navíc (např.:

vstupní usměrňovač). Podmínkou činnosti spínaného zdroje je stejnosměrné vstupní napětí, pokud možno co nejvíce zbavené střídavé složky, která vzhledem ke svému nízkému kmitočtu (50 Hz) snadno prochází celým filtrem, až na jeho výstup.[2]

Jsou dvě základní možnosti. Buď je vstupní napětí stejnosměrné, obvykle s velmi malým vnitřním odporem, kdy náročnost na vstupní filtr není vysoká. V druhém případě je vstupní napětí střídavé, a po jeho usměrnění vstupním usměrňovačem, je potřeba důkladně vyhladit jeho zbytkové zvlnění vstupním filtrem. [2]

V případě, kdy bude spínaný zdroj využit jen jako neharmonická zátěž, nebude ošetřen výstup zdroje. Pro tento účel stačí do měřeného zapojení připojit spínaný zdroj jako zátěž pomocí vstupu. Daný vstup bude střídavý, neboť celý obvod funguje na střídavé síti. Tento zdroj bude fungovat jako zátěž, proto nebude vysvětlena jeho funkčnost. Důležitým parametrem je vytvoření neharmonického signálu z harmonického. Tato změna je potřeba pro zjišťování vlivu cívky.

Výstupní napětí je získáváno ze vstupního pomocí spínání. Tyto zdroje mají též mnohem větší účinnost. Podle typu spínaného zdroje nastavujeme frekvenci. Většina spínaných zdrojů běží na frekvenci 50Hz až 1MHz.



Obr. 5.3.1 Blokové schéma spínaného zdroje

6 Použité přístroje

6.1 Napájecí zdroj – Hewlett Packard HP model 6834B

Zdroj lze použít jako generátor harmonických nebo neharmonických signálů. V případě harmonického signálu, lze nastavovat napětí, frekvenci, proudové omezení atd. Stejně tak i u neharmonických signálů. Neharmonické signály jsou zde dané anebo nastavitelné. V případě daných signálů můžeme generovat například obdélník či trojúhelník. Tyto signály můžeme dále upravovat, a to tak že k daným signálům přidáme některou z harmonických složek, čímž se změní tvar signálu. Tato změna může být využívána v případě harmonických signálů. Příkladem je přidání například 5 harmonické k sinusovému signálu, čímž dochází ke zkreslení, a z harmonického signálu se stává signál neharmonický. Velkou výhodou tohoto zdroje je možnost ovládání přes počítač. Lze měnit harmonický signál na neharmonický, nastavovat velikosti napětí, omezovat proud. V tomto rozhraní lze i zobrazit různé průběhy, například průběh napětí a proudu. Zkreslení signálu provádíme buď pomocí obrázku, kdy si signál vytváříme podle libosti, nebo také tabulkou kde si nastavíme přesné harmonické, které budou potřeba. V případě kreslení je přesné nastavení téměř neproveditelné.

Parametry zdroje:

Výstupní frekvenční rozsah:	45 Hz až 5 kHz
Počet fází:	1 nebo 3
Jmenovité hodnoty:	
• Napájení:	4500 VA/1500 VA
• RMS napětí	300 V (high range) 150 V (low range)
• RMS proudu	15 A/5 A (300 V Range) 30 A/10 A (150 V Range)
• Zkreslení amplitudy	4
• Kapacita účinniku zátěže	0 to 1

Katalogová dokumentace přiložena jako příloha.

6.2 Wattmetr Yokogawa - WT210

WT210 je stolní digitální wattmetr, který umožňuje měřit napětí, proud, výkon, účinník a další. Tyto hodnoty se zobrazují na digitálním displeji přístroje. Oproti klasickému měřicímu wattmetru nemusí být výkon počítán, také nemusíme do obvodu připojovat voltmetr a ampérmetr. Tímto omezíme rušení dalšími přístroji, neboť tyto přístroje mají svůj vnitřní odpor, což může způsobovat zkreslení v zobrazených průbězích, nebo chybu měření.

Parametry přístroje:

Frekvence: 0,5 Hz až 100 kHz

Napěťový měřicí rozsah je: 15; 30; 60; 100; 150; 300; 600 V

Proudový měřicí rozsah se dělí na dvě skupiny a to 0,2 A vstup a 20 A vstup, tyto rozsahy jsou na stejných svorkách, k přepínání slouží vnitřní přepínač.

Rozsah pro 0,2 A vstup: 5 mA; 10 mA; 20 mA; 50 mA; 100 mA; 200 mA

Rozsah pro 20 A vstup: 0,5 A; 1 A; 2 A; 5 A; 10 A; 20 A

Vysokorychlostní aktualizace dat. (cca 10 měření za vteřinu)

Pro měření bude využit vstup 5 A, neboť bude pracováno s proudem 2 A a menší. 5 A rozsah je volen pro případ, že měřený proud přesáhne 2 A, čímž by mohlo dojít k poškození zařízení v obvodu. Pro měření proudu je využit jediný proudový vstup, který je dimenzován na 20 A. Pro přesné měření bude měření prováděno na odpovídajícím rozsahu, tedy v druhé polovině, aby nedocházelo k chybám způsobených špatně nastaveným rozsahem.

6.3 Analyzátor sítě DEWE 571 firmy dewetron

Analyzátor sítě DEWE 571 je univerzální přenosný přístroj, který slouží k všeobecnému měření. Měřit můžeme napětí, proud, výkon, frekvenci, harmonické hodnoty signálu a další. Přístroj sleduje dané parametry, a ukládá je dle časového záznamu. Kromě měření a ukládání hodnot, je možné nastavit si vlastní uživatelské měření, s kterým uživatel dále pracuje. Pomocí uživatelského rozhraní lze zobrazit aktuální měřené hodnoty, vypočtené hodnoty z naměřených hodnot, grafy, průběhy pomocí osciloskopu a další.

Analogové (dynamické) vstupní kanály	4 voltage, 4 current
Proudové kleště / coils included	4 × PNA-FLEX-300-45
Napěťový rozsah	±1400 V peak
Stejnoseměrný vstupní proud	5 A
Maximální vstupní proud pomocí flexible coils	10000 A
Provozní teplota	0 to +50 °C (0 to +45 with batteries)
Skladovací teplota	-20 to + 70 °C
Vlhkost	10 to 80 % non cond., 5 to 95 % rel. Humidity
Ukládání dat	
Technologie	Solid State Disk
Kapacita	32 GB
Hlavní systém	
Displej	12°TFT (1280 x 800)
Procesor	Intel Core™ 2 Duo 2 GHz
Rozhraní	USB, Ethernet, RS-232

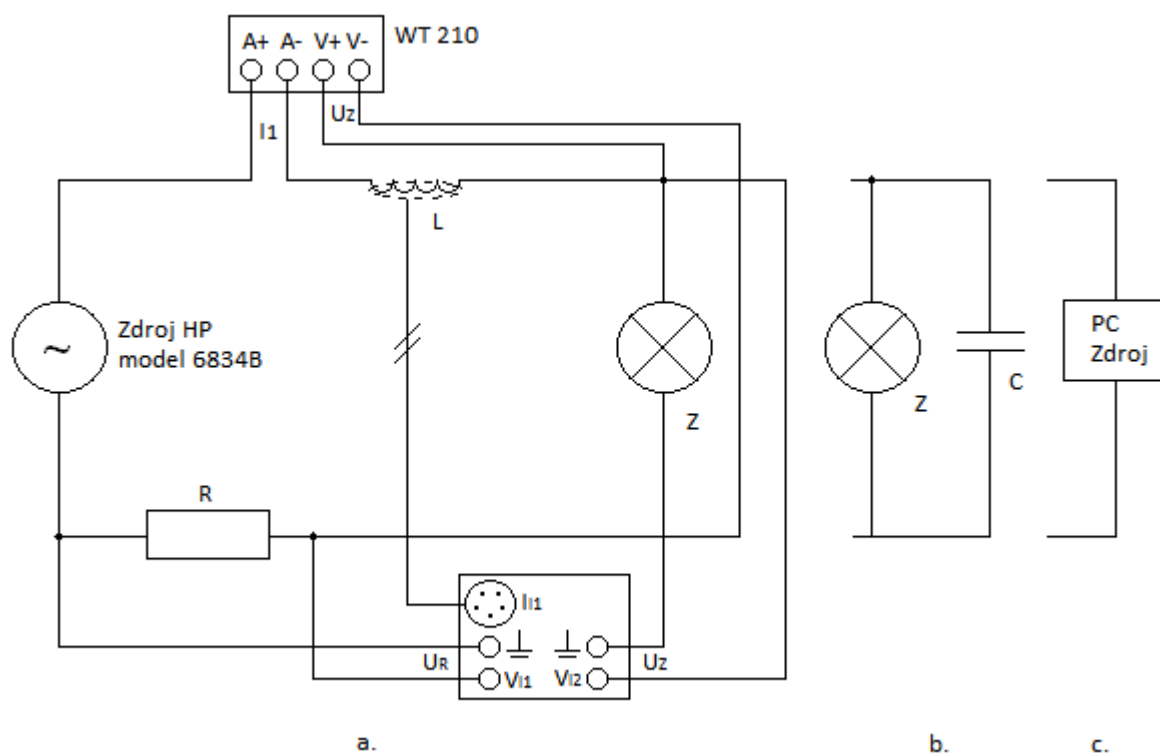
PNA-FLEX-300-45 /PNA-FLEX-300-45

Vstupní rozsah AC	0,5 to 300 A	selectable	0,5 to 3000 A	
Výstup	10 mV/A		1 mV/A	
Přesnost	0,5 to 5 A	not specified	0,5 to 5 A	not specified
	5 to 300 A	$\leq 1 \%$	5 to 3000 A	$\leq 1 \%$
Šířka pásma	10 Hz ... 20 kHz			
Fázový posun	0,5 to 5 A	$\leq 0,7^\circ$	0,5 to 5 A	$\leq 0,7^\circ$
	5 to 300 A	$\leq 0,7^\circ$	5 to 3000 A	$\leq 0,7^\circ$

Využívá měřicí karty ORION-0816-1000 – parametry jsou přiložené jako příloha.

Praktická část

7 Testování zátěží



Obr. 6.3.1 Schéma zapojení měření: a.) s odporovou zátěží b.) s RC zátěží c.) s nelineární zátěží (Zdroj Pc)

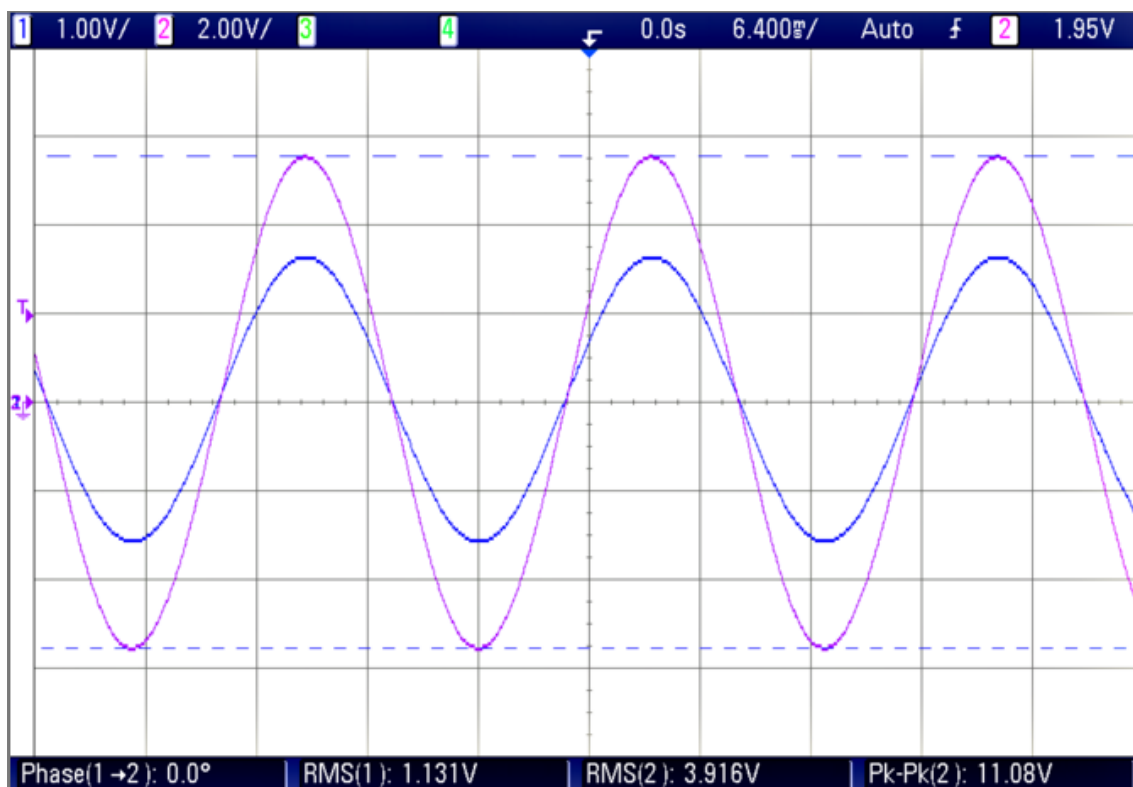
V obvodu bude využíván střídavý zdroj Hewlett Packard. Pomocí wattmetru WT210 bude měřen přímý proud za zdrojem, a napětí na zátěži. Dále bylo využito analyzačního softwaru DEWE 571. Tímto přístrojem bude měřeno napětí na odporu, napětí na zátěži a indukovaný proud na cívce. Naměřené hodnoty napětí a proudu wattmetru budou porovnány s naměřenými hodnotami napětí a proudu z DEWE 571. Měření bude probíhat se třemi zátěžemi. První měření proběhne s odporovou zátěží, další s RC zátěží, a poslední se zdrojem PC jako zátěž.

7.1 Odporová zátěž – žárovka

Tab. 1 Naměřené hodnoty pro odporovou zátěž

Zdroj		WT210			
I limit (A)	U (V)	I (A)	U (V)	PF	deg
1	230	0,999	18,3	1	0,2
2	230	2	66,01	1	0,19
3	230	2,999	137,87	1	0,2
4	230	4	229	1	0,2

Frekvence na zdroji je rovna 50Hz. Proudový limit na zdroji způsobil napěťové omezení v obvodu, aby nedošlo k překročení povoleného proudu. Hodnota Power Faktoru (PF - účinníku) je rovna jedné, čímž jsme si ověřili, že zátěž je odporová. Fázový posuv je zanedbatelný, jeho hodnota se pohybuje okolo $0,2^\circ$, což lze vidět na Obr. 7.1.1.



Obr. 7.1.1 Průběh proudu a napětí na odporové zátěži

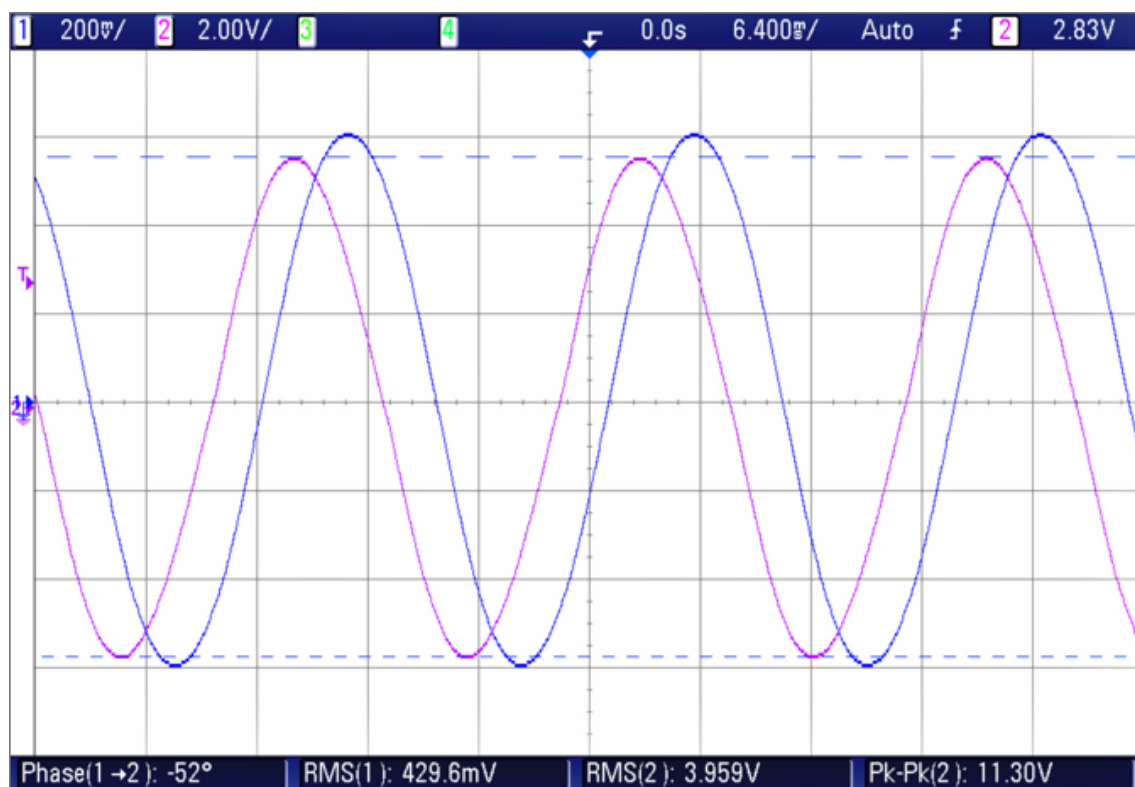
(Fialová křivka – proudový průběh; Modrá křivka – napěťový průběh)

7.2 RC zátěž

Tab. 2 Naměřené hodnoty pro RC zátěž

Zdroj		WT210			
I limit (A)	U (V)	I (A)	U (V)	PF	deg
1	230	0,998	12,5	0,8721	26,9°
2	230	1,998	35,71	0,7308	43°
3	230	3	60,5	0,6397	50,3°
4	230	4	85,55	0,5786	54,6°
5	230	5	110,87	0,5337	57,8°

Pro měření byla použita RC zátěž, při frekvenci 50Hz. Stejně jako v předchozím případě měření, i zde dochází k napětíovému omezení v obvodu. Vlivem této zátěže, došlo k fázovému posunu mezi napětím a proudem, jak je vidět na Obr. 7.2.1. Fázový posuv narůstá s narůstajícím proudem.



Obr. 7.2.1 Průběh na RC zátěži

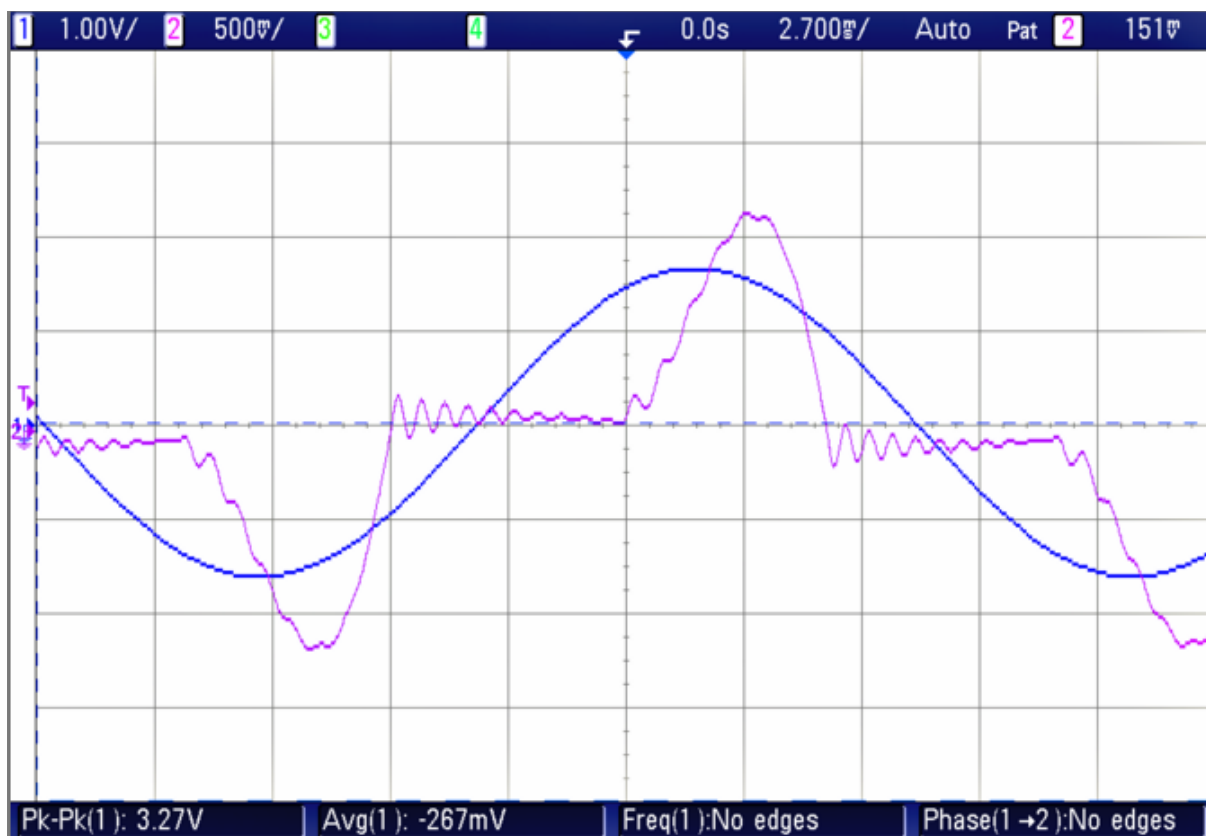
(Fialová křivka – proudový průběh; Modrá křivka – napětíový průběh)

7.3 Nelineární zátěž

Pro další měření bude použita nelineární zátěž. Pro testování bude využito dvou stolních PC a jednoho notebooku. Bude využito zdrojů přístrojů, které jsou konstruované jako spínané. Každý z těchto prvků má odlišný výkon, pro další měření bude vybrán jeden z těchto přístrojů, s nejlepšími parametry.

Tab. 3 Naměřené hodnoty pro nelineární zátěž zdroje - PC Autocont

Zátěž	Zdroj		WT210			
	I limit (A)	U (V)	I (A)	U (V)	PF	deg
Notebook	3	230	0,4	230	0,52	58°
PC Alfa	3	230	0,075	230	0,198	d 78,6°
PC Autocont	3	230	0,49	230	0,76	d 39,8°



Obr. 7.3.1 Průběh na zátěži - Zdroj PC Autocont

(Fialová křivka – proudový průběh. Modrá křivka – napěťový průběh)

V případě počítače PC Alfa, byl odběr přístroje velmi malý, což je pro další měření nevyhovující. Také v případě notebooku nebyl charakter zátěže dle očekávání, a proto jej nebudeme dále využívat. Nejlepší parametry pro další měření vykazoval zdroj PC Autocont Obr. 7.3.1 kde je proudový odběr $I = 0,5$ A. Vzhledem k této skutečnosti můžeme měření s nelineární zátěží (Zdroj - PC Autocont) porovnat s měřením s lineární zátěží.

8 Měření proudů v obvodu a na cívce, definice chyb

8.1 Měření chyb při harmonickém průběhu napětí a lineární zátěži

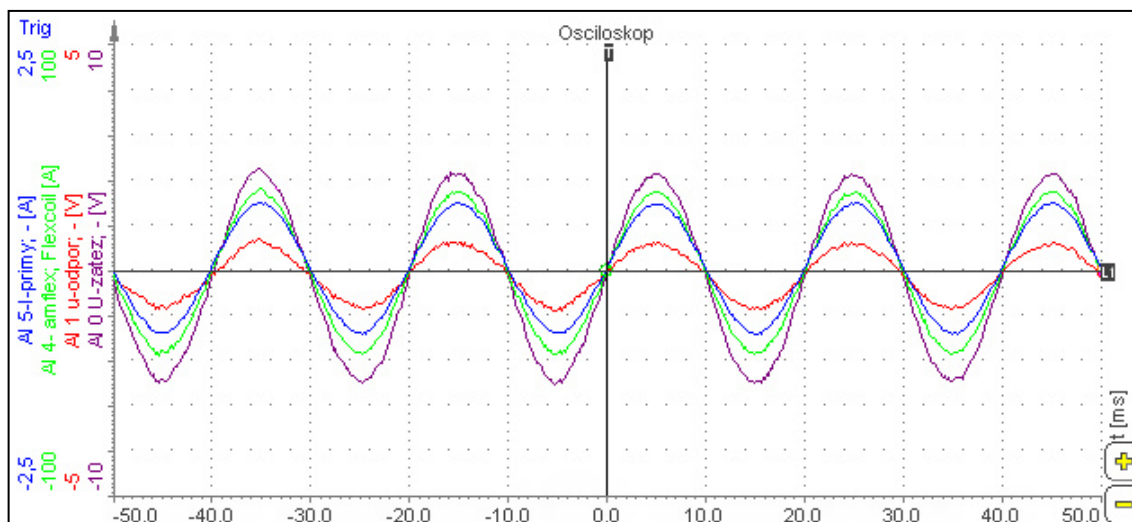
Měření bylo provedeno pro různé proudy v obvodu s cívkou o počtu závitů $N = 50$ nebo $N = 300$. Proud bude nastavován postupně ve třech stupních $I = 0,5$ A; 1 A a 2 A. Nejnižší proud bude využit pro srovnávání výsledků měření s nelineární zátěží, neboť odběr PC zdroje v obvodu je přibližně $I = 0,5$ A. Tato vlastnost byla zjištěna pomocí testování zátěží. Další proudy budou využity pro srovnávání výsledků měření s neharmonickým průběhem. Obvodem bude procházet harmonické napětí i proud, tedy obvodem budou procházet sinusové signály. Vzhledem k sinusovému signálu, který by neměl mít vliv na měření v obvodu, je předpokládáno, že definované chyby nebudou velké a budou odpovídat třídě přesnosti daných měřicích přístrojů. Harmonický průběh zajistíme nastavením sinusového signálu na zdroji. Jako zátěž využijeme žárovku o maximálním výkonu 200 W, která nezkrusí dané průběhy, a může být považována za lineární zátěž.

8.1.1 Měření na cívce o $N = 50$ při harmonickém průběhu napětí a lineární zátěži

Pomocí zdroje bude nastaven požadovaný proud v obvodu, který bude kontrolován pomocí wattmetru WT210 aby zůstal pokud možno konstantní. Jedná se o nastavování proudů $I = 0,5$ A; 1 A; 2 A. Na Analyzačním softwaru Dewetron změříme průběh v obvodu. Dále bude měřeno napětí a proud v různých částech obvodu. Pomocí přístroje DEWE 571 byly uloženy průměrné hodnoty efektivních hodnot RMS – hodnota napětí na zátěži, hodnota napětí na odporu, hodnota proudu z Amflexu tedy cívky, hodnota přímého proudu, frekvence a výkonů, s kterými bude dále pracováno.

- **Měření při $I = 0,5$ A, $N = 50$, $f = 50$ Hz**

Na wattmetru WT210 byla nastavena hodnota proudu $I = 0,5$ A. Pomocí analyzačního softwaru Dewetronu a wattmetru WT210 byly získány potřebná data z měření, pro zjištění chyb vznikajících v obvodu.

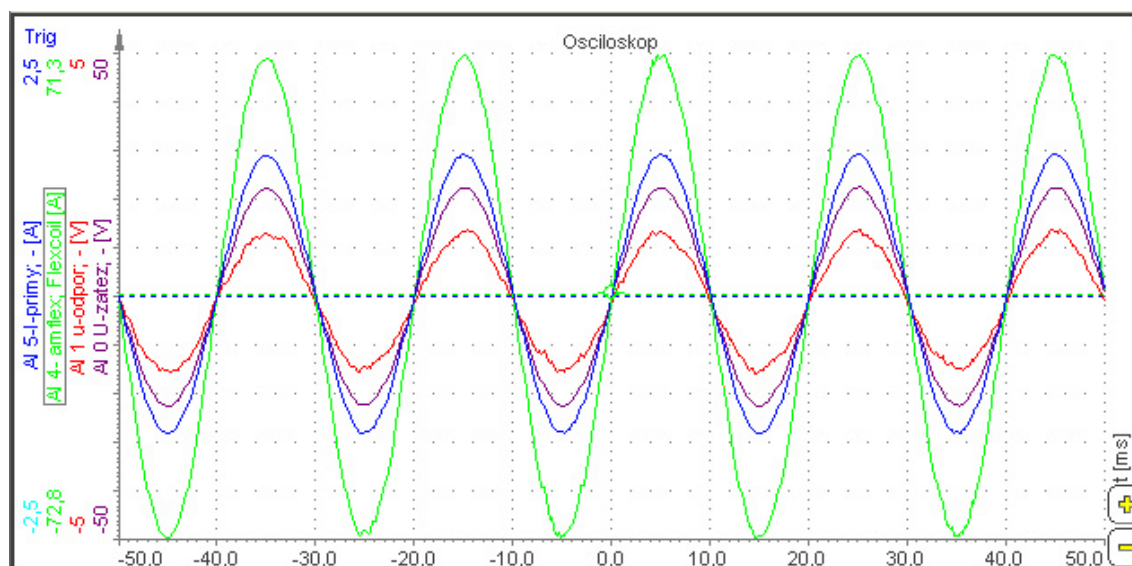


Obr. 8.1.1 Průběh harmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 0,5 \text{ A}$, $N = 50$

Na Obr. 8.1.1 lze vidět průběhy signálů obvodem. Tyto signály jsou ve stejné fázi, tedy nevzniká zde fázový posun. Proudový signál AI 4 Amflex, je mnohem více zkreslený než v případě měření s proudem $I = 2 \text{ A}$. Ke stejnému jevu dochází v případě napětí na zátěži. Tato zkreslení jsou způsobená nízkým nastavením proudu. Pro každý signál, využíváme jiných rozsahů.

- **Měření při $I = 1 \text{ A}$, $N = 50$, $f = 50 \text{ Hz}$**

Z naměřených a vypočtených dat vyplývá, že relativní chyba se pohybuje od 0 do 0,5 % podobně jako v předchozím případě. Porovnáváme-li naměřenou hodnotu na Dewetronu se skutečnou hodnotou, kterou bychom měli naměřit na cívce, dostaneme rozdíl, z něž bude dále vypočtena chyba měření. Skutečná hodnota $S_h = I \cdot N = 50 \text{ A}$, neboť $N = 50$, $I = 1 \text{ A}$

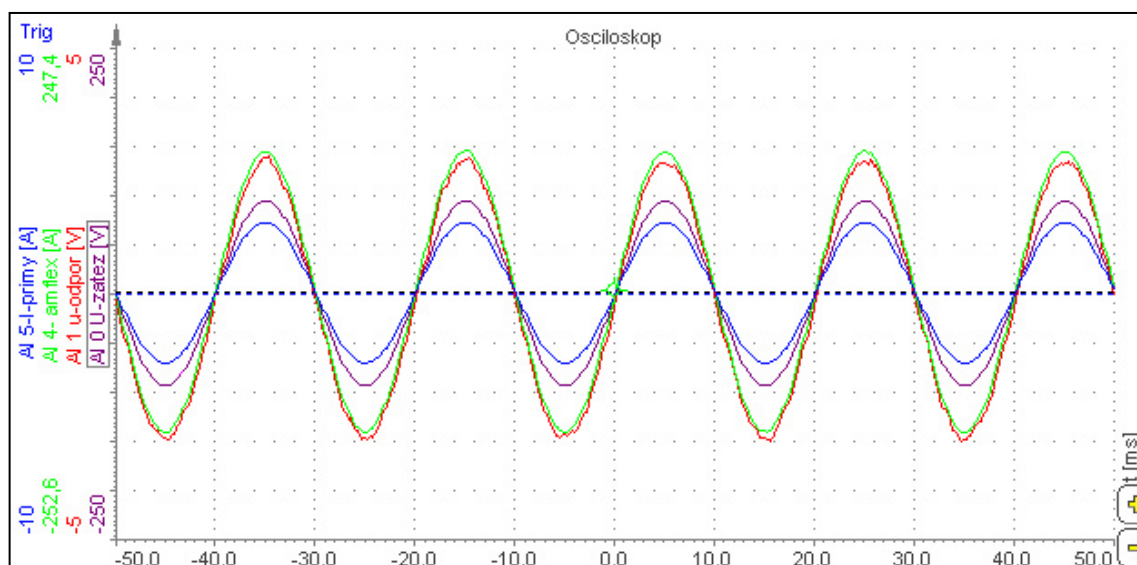


Obr. 8.1.2 Průběh harmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 1 \text{ A}$, $N = 50$

Zkreslení signálů na Obr. 8.1.2 je mnohem menší než v předchozím případě měření. Vzhledem k lineární zátěži, zde nedochází k fázovému posunu, ani k zásadnímu zkreslení signálu, v grafu je vidět minimální zkreslení, které lze zanedbat.

- **Měření při $I = 2 \text{ A}$, $N = 50$, $f = 50 \text{ Hz}$**

I zde se projevuje relativní chyba měření a to zhruba od 0 do 0,5 %. Skutečná hodnota $S_h = I \cdot N = 100 \text{ A}$, neboť $N = 50$, $I = 2 \text{ A}$.



Obr. 8.1.3 Průběh harmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 2 \text{ A}$, $N = 50$

Signály na Obr. 8.1.3 jsou ve fázi, není zde fázový posun. Signály jsou zkreslené minimálně, nejvíce zkreslené je napětí na odporu. Úroveň napětí se mění velmi málo, vlivem rozsahu nastaveného na měřicím přístroji DEWE 571. Křivky nejsou stejné velikosti, neboť každá křivka má svůj rozsah.

8.1.2 Vzorce platné pro výpočet hodnot v následujících tabulkách

U daných vzorců je uveden příklad výpočtu pro tabulku vzorků proudů, pro měření při $f = 50 \text{ Hz}$, $I = 0,5 \text{ A}$, $N = 50$ při harmonickém průběhu a zátěži.

Proud I_N se vypočte jako:

$$I_N = N \cdot I_{\text{RMS}} = 50 \cdot 0,5 = 25 \text{ A} \quad (15)$$

Výpočet rozdílu proudů I_C :

$$I_C = I_{\text{LRMS}} - I_N = 24,942 - 25,016 = -0,074 \text{ A} \quad (16)$$

Proud I_{CY} měřený pomocí wattmetru WT210 se vypočte jako:

$$I_{CY} = N \cdot I_Y = 50 \cdot 0,5 = 25 \text{ A} \quad (17)$$

Výpočet absolutní chyby:

$$\Delta = I_{LRMS} \cdot -I_{CY} = 24,942 - 25 = -0,058 \text{ A} \quad (18)$$

Výpočet relativní chyby:

$$\delta = \left(\frac{\Delta}{I_{CY}} \right) \cdot 100 = \left(\frac{-0,058}{25} \right) \cdot 100 = -0,231 \% \quad (19)$$

Výpočet výkonu P_A pro neindukující se proud je:

$$P_A = U_{RMS} \cdot I_{RMS} = 3,271 \cdot 0,5 = 1,637 \text{ W} \quad (20)$$

Výpočet výkonu P_B pro indukující se proud je

$$P_B = U_{RMS} \cdot I_{LRMS} = 3,271 \cdot 24,942 = 81,594 \text{ W} \quad (21)$$

Rozdíl výkonů P_{AR} :

$$P_{AR} = P_A - P_1 = 1,637 - 1,622 = 0,015 \text{ W} \quad (22)$$

Rozdíl naměřeného a vypočteného výkonu P_{BR} :

$$P_{BR} = P_B - P_2 = 81,594 - 81,456 \text{ W} \quad (23)$$

Kde je: I_N Střední hodnota proudu násobená počtem závitů

N Počet závitů cívky

I_{RMS} Střední hodnota proudu jedné periody

I_C Rozdíl indukovaných proudů (jedná se o proudy měřené na měřicí cívce)

I_{LRMS} Střední hodnota proudu indukovaného na cívce

I_Y Proud naměřený na wattmetru WT210

I_{CY} Proud naměřený pomocí WT210 násobený počtem závitů

U_{RMS} Střední hodnota napětí na zátěži jedné periody

P_1 Hodnota výkonu daná analyzačním softwarem Dewetron při měření proudu v obvodu

P_2 Hodnota výkonu daná analyzačním softwarem Dewetron při měření proudu na cívce

Tab. 4 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 0,5$ A, $N = 50$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži

Time (s)	U_z (V)	U_R (V)	I_L (A)	I (A)	f (Hz)	U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	I_N (A)	I_C (A)	I_Y (A)	I_{CY} (A)	Δ (A)	δ (%)
50,0	0,481	-0,037	5,755	0,149	50,000	3,271	0,500	24,942	25,000	-0,058	0,500	25,000	-0,058	-0,232
50,2	0,368	-0,043	3,960	0,119	50,000	3,271	0,500	24,942	25,000	-0,058	0,500	25,000	-0,058	-0,232
50,4	0,242	-0,043	3,651	0,115	50,000	3,250	0,499	24,848	24,950	-0,102	0,500	25,000	-0,152	-0,608
50,6	0,305	-0,031	3,837	0,107	50,000	3,240	0,499	24,826	24,950	-0,124	0,500	25,000	-0,174	-0,696
50,8	0,192	-0,075	3,589	0,114	50,000	3,239	0,499	24,845	24,950	-0,105	0,500	25,000	-0,155	-0,620
51,0	0,581	0,038	4,703	0,112	50,000	3,277	0,500	24,932	25,000	-0,068	0,500	25,000	-0,068	-0,272
51,2	0,305	-0,043	4,022	0,111	50,000	3,277	0,500	24,932	25,000	-0,068	0,500	25,000	-0,068	-0,272
51,4	0,154	-0,106	3,899	0,105	50,000	3,256	0,500	24,854	25,000	-0,146	0,500	25,000	-0,146	-0,584
51,6	0,569	0,038	5,012	0,122	50,000	3,273	0,500	24,922	25,000	-0,078	0,500	25,000	-0,078	-0,312
51,8	0,280	-0,043	3,775	0,105	50,000	3,239	0,499	24,786	24,950	-0,164	0,500	25,000	-0,214	-0,856

Tab. 5 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 0,5$ A, $N = 50$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži

U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	P_A (W)	P_B (W)	P_{AR} (W)	P_{BR} (W)
3,271	0,500	24,942	1,622	81,456	1,636	81,594	0,014	0,138
3,271	0,500	24,942	1,622	81,456	1,636	81,594	0,014	0,138
3,250	0,499	24,848	1,609	80,610	1,622	80,754	0,012	0,144
3,240	0,499	24,826	1,603	80,321	1,617	80,443	0,014	0,123
3,239	0,499	24,845	1,602	80,350	1,616	80,469	0,014	0,118
3,277	0,500	24,932	1,625	81,575	1,639	81,700	0,013	0,126
3,277	0,500	24,932	1,625	81,575	1,639	81,700	0,013	0,126
3,256	0,500	24,854	1,612	80,759	1,626	80,926	0,014	0,166
3,273	0,500	24,922	1,623	81,343	1,636	81,584	0,014	0,241
3,239	0,499	24,786	1,604	80,081	1,618	80,295	0,014	0,214

Tab. 6 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 50$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži

Time (s)	U_z (V)	U_R (V)	I_L (A)	I (A)	f (Hz)	U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	I_N (A)	I_C (A)	I_Y (A)	I_{CY} (A)	Δ (A)	δ (%)
50,0	-18,026	-1,207	-57,179	-1,127	50,002	15,652	1,000	49,846	50,000	-0,154	1,000	50,000	-0,154	-0,308
50,2	-18,177	-1,276	-57,241	-1,119	50,001	15,637	0,999	49,803	49,950	-0,147	1,000	50,000	-0,197	-0,394
50,4	-17,800	-1,138	-56,312	-1,110	49,999	15,652	1,000	49,885	50,000	-0,115	1,000	50,000	-0,115	-0,230
50,6	-18,303	-1,294	-57,736	-1,124	49,999	15,645	1,000	49,868	50,000	-0,132	1,000	50,000	-0,132	-0,264
50,8	-18,101	-1,251	-56,931	-1,122	50,000	15,634	1,000	49,856	50,000	-0,144	1,000	50,000	-0,144	-0,288
51,0	-18,064	-1,219	-56,436	-1,120	50,000	15,649	1,000	49,826	50,000	-0,174	1,000	50,000	-0,174	-0,348
51,2	-18,189	-1,282	-57,364	-1,123	49,999	15,642	1,000	49,775	50,000	-0,225	1,000	50,000	-0,225	-0,450
51,4	-18,227	-1,294	-57,426	-1,123	49,999	15,646	1,000	49,809	50,000	-0,191	1,000	50,000	-0,191	-0,382
51,6	-18,039	-1,238	-56,498	-1,110	50,001	15,650	1,000	49,838	50,000	-0,162	1,000	50,000	-0,162	-0,324
51,8	-18,164	-1,263	-57,364	-1,121	50,003	15,650	1,000	49,800	50,000	-0,200	1,000	50,000	-0,200	-0,400

Tab. 7 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 50$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži

U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	P_A (W)	P_B (W)	P_{AR} (W)	P_{BR} (W)
15,652	1,000	49,846	15,640	780,068	15,650	780,176	0,010	0,108
15,637	0,999	49,803	15,617	778,661	15,627	778,755	0,010	0,094
15,652	1,000	49,885	15,644	780,700	15,654	780,790	0,010	0,090
15,645	1,000	49,868	15,634	780,095	15,644	780,197	0,010	0,102
15,634	1,000	49,856	15,621	779,383	15,631	779,474	0,010	0,091
15,649	1,000	49,826	15,637	779,644	15,647	779,736	0,010	0,092
15,642	1,000	49,775	15,627	778,469	15,637	778,554	0,010	0,085
15,646	1,000	49,809	15,631	779,242	15,641	779,330	0,010	0,089
15,650	1,000	49,838	15,642	779,871	15,651	779,958	0,010	0,087
15,650	1,000	49,800	15,632	779,265	15,643	779,364	0,010	0,099

Tab. 8 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 2$ A, $N = 50$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži

Time (s)	U_z (V)	U_R (V)	I_L (A)	I (A)	f (Hz)	U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	I_N (A)	I_C (A)	I_Y (A)	I_{CY} (A)	Δ (A)	δ (%)
50,0	84,138	2,465	127,662	2,583	50,000	66,093	2,005	100,034	100,250	-0,216	2,000	100,000	0,034	0,034
50,2	81,247	2,353	123,145	2,502	50,001	66,093	2,005	100,034	100,250	-0,216	2,000	100,000	0,034	0,034
50,4	81,410	2,397	124,073	2,516	50,000	66,107	2,006	100,002	100,300	-0,298	2,000	100,000	0,002	0,002
50,6	81,196	2,265	123,207	2,494	50,001	66,106	2,006	100,046	100,300	-0,254	2,000	100,000	0,046	0,046
50,8	81,385	2,365	124,011	2,497	50,000	66,106	2,006	100,045	100,300	-0,255	2,000	100,000	0,045	0,045
51,0	81,234	2,315	123,702	2,503	50,000	66,098	2,006	100,045	100,300	-0,255	2,000	100,000	0,045	0,045
51,2	81,284	2,290	123,392	2,504	50,000	66,098	2,006	100,045	100,300	-0,255	2,000	100,000	0,045	0,045
51,4	81,297	2,284	122,402	2,489	50,000	66,103	2,006	100,045	100,300	-0,255	2,000	100,000	0,045	0,045
51,6	81,435	2,347	123,640	2,504	50,000	66,107	2,006	100,013	100,300	-0,287	2,000	100,000	0,013	0,013
51,8	81,272	2,240	123,021	2,483	50,000	66,090	2,006	100,064	100,300	-0,236	2,000	100,000	0,064	0,064

Tab. 9 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 2$ A, $N = 50$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži

U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	P_A (W)	P_B (W)	P_{AR} (W)	P_{BR} (W)
66,093	2,005	100,034	132,527	6610,797	132,538	6611,565	0,010	0,768
66,093	2,005	100,034	132,527	6610,797	132,538	6611,565	0,010	0,768
66,107	2,006	100,002	132,567	6609,982	132,578	6610,793	0,011	0,811
66,106	2,006	100,046	132,602	6612,825	132,613	6613,575	0,011	0,749
66,106	2,006	100,045	132,607	6612,792	132,618	6613,523	0,011	0,731
66,098	2,006	100,045	132,604	6612,105	132,615	6612,830	0,011	0,725
66,098	2,006	100,045	132,604	6612,105	132,615	6612,830	0,011	0,725
66,103	2,006	100,045	132,608	6612,514	132,619	6613,257	0,011	0,743
66,107	2,006	100,013	132,569	6610,672	132,580	6611,552	0,011	0,880
66,090	2,006	100,064	132,579	6612,437	132,590	6613,242	0,011	0,806

Světle modrou barvou jsou znázorňovány sloupce proudů, které jsou porovnávány a zhodnoceny. V tabulce výkonů jsou šedou barvou znázorněny výkony pro přímý proud. Hnědou barvou jsou znázorněny výkony, počítané s proudem vynásobeným počtem závitů na cívce. Z výše uvedených tabulek vyplývá, že absolutní chyba se zmenšuje s narůstajícím proudem. Stejně tak se zmenšuje relativní chyba s narůstajícím proudem. Chyby se zmenšují díky tomu, že proud $I = 1 \text{ A}$ je měřen v prostřední části rozsahu, nejvyšší proud $I = 2 \text{ A}$ měříme v druhé části rozsahu, tedy měření je přesnější a nevzniká tak velká chyba. Dle naměřených středních hodnot napětí a proudu bude vypočten výkon, který porovnáme s výkonem vypočteným softwarem DEWE 571. Správně by tento rozdíl měl být nulový, ale vlivem chyb přístroje jsou tyto chyby nenulové. I zde je patrné, že se dané rozdíly zmenšují s narůstajícím proudem.

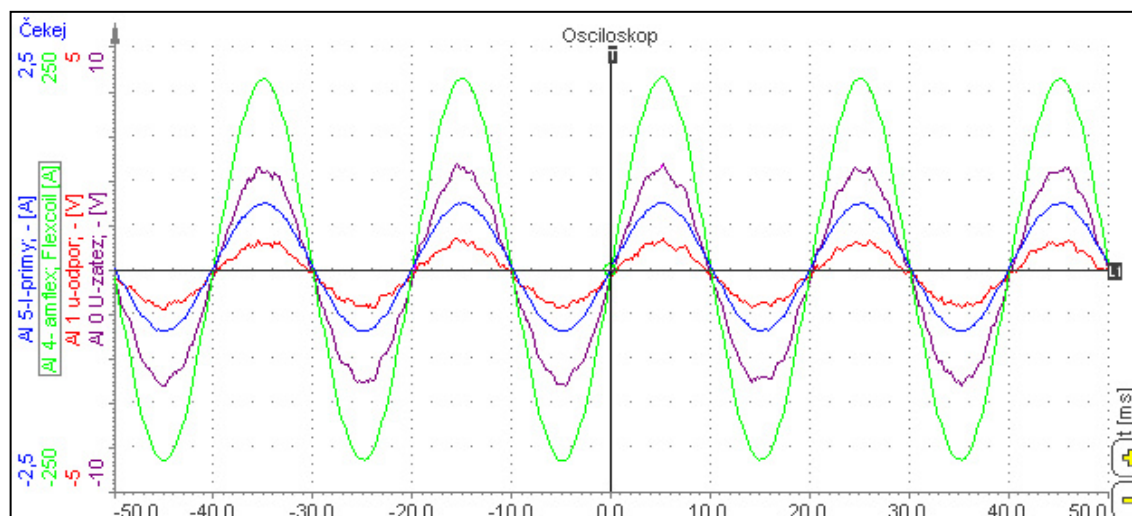
Rozdíl naměřeného a vypočteného výkonu za zdrojem, je minimální a stejný při různých proudech. Porovnáme-li výkony naměřené a vypočtené pomocí proudu měřeného na cívce, zjistíme, že se chyba se zvětšujícím se proudem zvětšuje. To je způsobeno chybou měřicího přístroje, neboť proudový snímač Amflex má třídu přesnosti $T_p = 1 \%$.

8.1.3 Měření na cívce o $N = 300$ při harmonickém průběhu napětí a lineární zátěži

V obvodu byla změněna cívka, další měření probíhalo s cívkou o celkovém počtu závitů $N = 300$. Stejně jako v předchozím případě budou postupně nastavovány různé proudy $I = 0,5 \text{ A}$; 1 A ; 2 A . Cílem je zjistit, zda chyba měření bude v případě cívky s větším počtem závitů menší, či větší, nebo stejně velká jako u ostatních případů měření.

- **Měření při $I = 0,5 \text{ A}$, $N = 300$, $f = 50 \text{ Hz}$**

Nastavení parametrů je stejné jako v předchozích případech, s tím rozdílem, že cívka má větší počet závitů $N = 300$. První měření se provádí s proudem $I = 0,5 \text{ A}$.

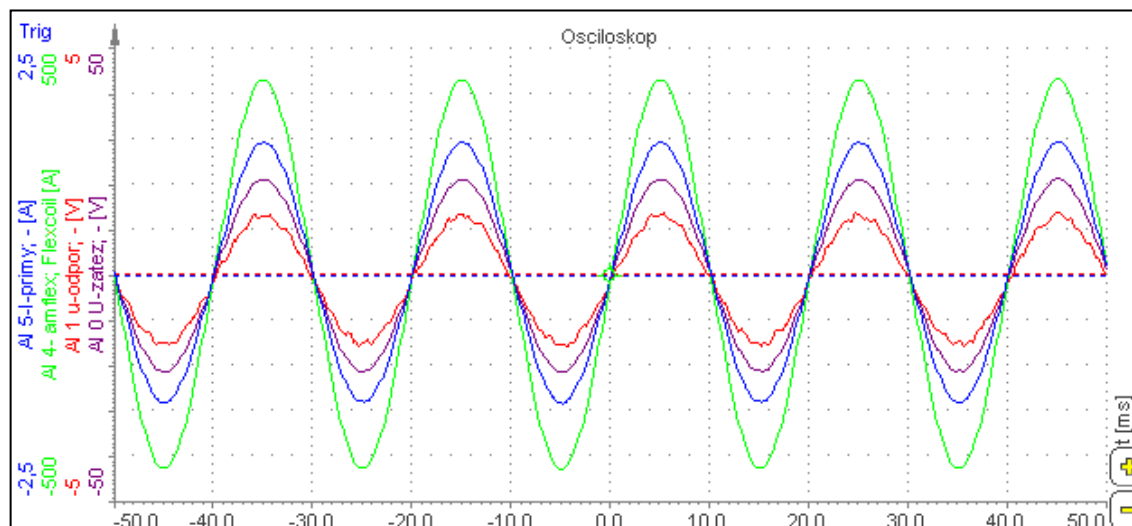


Obr. 8.1.4 Průběh harmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 0,5 \text{ A}$, $N = 300$

Na Obr. 8.1.4 je patrné zkreslení napětových signálů, tyto zkreslení jsou větší než v případě měření s cívkou o $N = 50$, $I = 0,5$ A. Toto zkreslení je způsobené měřením na cívce s 300 závitů, protože měříme v krajní části rozsahu. Signály jsou ve fázi.

- **Měření při $I = 1$ A, $N = 300$, $f = 50$ Hz**

Nastavení parametrů je stejné jako v předchozích případech. Proud v obvodu $I = 1$ A

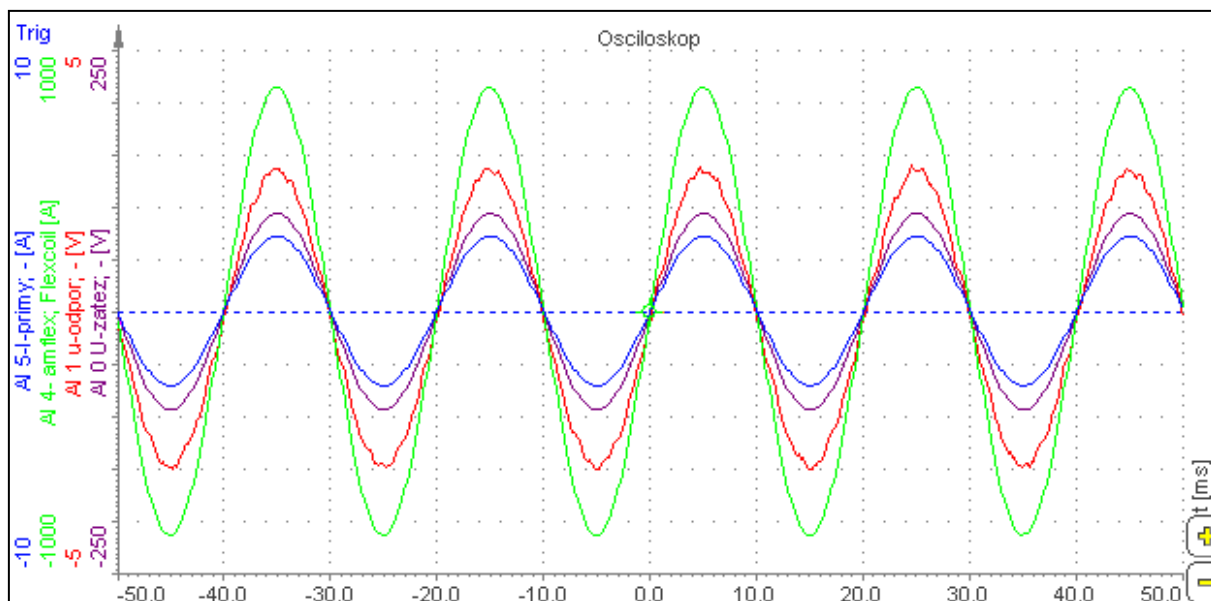


Obr. 8.1.5 Průběh harmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 1$ A, $N = 300$

Díky většímu proudu v obvodu, dochází ke zkreslení pouze napětí na zátěži. Toto zkreslení je menší než zkreslení v předchozím případě, neboť již neměříme v krajní části rozsahu.

- **Měření při $I = 2$ A, $N = 300$, $f = 50$ Hz**

Nadále je využito stejných parametrů, jako v předchozích případech. Proud v obvodu $I = 2$ A



Obr. 8.1.6 Průběh harmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 2$ A, $N = 300$

Zkreslení je menší než v případě měření s $I = 0,5$ a 1 A. Přístroj měří lépe s vyšším proudem, neboť dochází k měření ve větší části rozsahu. Tímto je měření přesnější. Signály jsou ve fázi a nedochází zde k fázovému posunu, neboť je zde využita odporová zátěž.

Tab. 10 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 0,5$ A, $N = 300$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži

Time (s)	U_z (V)	U_R (V)	I_L (A)	I (A)	f (Hz)	U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	I_N (A)	I_C (A)	I_Y (A)	I_{CY} (A)	Δ (A)	δ (%)
50,0	4,215	0,532	203,529	0,706	50	3,392	0,500	149,230	150,000	-0,770	1	150	-0,770	-0,513
50,2	4,441	0,589	204,210	0,698	50	3,392	0,500	149,230	150,000	-0,770	1	150	-0,770	-0,513
50,4	4,252	0,526	204,581	0,698	50	3,385	0,500	149,231	150,000	-0,769	1	150	-0,769	-0,513
50,6	4,215	0,501	203,777	0,701	50	3,393	0,500	149,287	150,000	-0,713	1	150	-0,713	-0,475
50,8	4,278	0,532	203,343	0,695	50	3,394	0,500	149,334	150,000	-0,666	1	150	-0,666	-0,444
51,0	4,190	0,501	204,395	0,693	50	3,388	0,500	149,226	150,000	-0,774	1	150	-0,774	-0,516
51,2	4,315	0,557	204,829	0,700	50	3,388	0,500	149,226	150,000	-0,774	1	150	-0,774	-0,516
51,4	4,630	0,664	207,056	0,717	50	3,392	0,499	149,215	149,700	-0,485	1	150	-0,785	-0,523
51,6	4,190	0,514	204,829	0,703	50	3,389	0,500	149,166	150,000	-0,834	1	150	-0,834	-0,556
51,8	4,127	0,495	204,952	0,698	50	3,390	0,500	149,231	150,000	-0,769	1	150	-0,769	-0,513

Tab. 11 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 0,5$ A, $N = 300$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži

U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	P_A (W)	P_B (W)	P_{AR} (W)	P_{BR} (W)
3,392	0,500	149,230	1,681	504,116	1,694	506,191	0,014	2,075
3,392	0,500	149,230	1,681	504,116	1,694	506,191	0,014	2,075
3,385	0,500	149,231	1,678	503,126	1,691	505,132	0,013	2,006
3,393	0,500	149,287	1,682	504,266	1,696	506,562	0,014	2,296
3,394	0,500	149,334	1,683	504,702	1,697	506,870	0,014	2,168
3,388	0,500	149,226	1,680	503,296	1,694	505,635	0,014	2,338
3,388	0,500	149,226	1,680	503,296	1,694	505,635	0,014	2,338
3,392	0,499	149,215	1,680	503,786	1,694	506,095	0,014	2,310
3,389	0,500	149,166	1,680	503,289	1,694	505,585	0,014	2,296
3,390	0,500	149,231	1,680	503,589	1,694	505,937	0,014	2,348

Tab. 12 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 300$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži

Time (s)	U_z (V)	U_R (V)	I_L (A)	I (A)	f (Hz)	U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	I_N (A)	I_C (A)	I_Y (A)	I_{CY} (A)	Δ (A)	δ (%)
50,0	2,832	0,001	65,161	0,213	50,000	15,602	1,000	298,859	300,000	-1,141	1	300	-1,141	-0,380
50,2	3,196	0,132	65,657	0,218	50,001	15,602	1,000	298,859	300,000	-1,141	1	300	-1,141	-0,380
50,4	3,083	0,094	65,471	0,221	50,000	15,612	1,000	298,997	300,000	-1,003	1	300	-1,003	-0,334
50,6	2,983	0,057	65,904	0,227	50,000	15,623	0,999	298,919	299,700	-0,781	1	300	-1,081	-0,360
50,8	3,033	0,076	64,666	0,225	50,000	15,621	1,000	298,970	300,000	-1,030	1	300	-1,030	-0,343
51,0	3,146	0,101	66,213	0,225	50,000	15,621	0,999	298,827	299,700	-0,873	1	300	-1,173	-0,391
51,2	2,920	0,019	67,080	0,222	50,000	15,621	0,999	298,827	299,700	-0,873	1	300	-1,173	-0,391
51,4	3,347	0,176	67,761	0,228	50,000	15,628	1,000	298,895	300,000	-1,105	1	300	-1,105	-0,368
51,6	3,008	0,032	66,337	0,229	50,001	15,630	1,000	299,013	300,000	-0,987	1	300	-0,987	-0,329
51,8	3,096	0,088	68,008	0,230	50,001	15,627	1,000	299,102	300,000	-0,898	1	300	-0,898	-0,299

Tab. 13 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 300$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži

U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	P_A (W)	P_B (W)	P_{AR} (W)	P_{BR} (W)
15,602	1,000	298,859	15,584	4661,460	15,594	4662,780	0,010	1,320
15,602	1,000	298,859	15,584	4661,460	15,594	4662,780	0,010	1,320
15,612	1,000	298,997	15,602	4666,662	15,612	4667,928	0,010	1,267
15,623	0,999	298,919	15,604	4668,950	15,615	4670,097	0,011	1,147
15,621	1,000	298,970	15,612	4669,086	15,623	4670,189	0,010	1,102
15,621	0,999	298,827	15,601	4666,940	15,611	4668,067	0,011	1,127
15,621	0,999	298,827	15,601	4666,940	15,611	4668,067	0,011	1,127
15,628	1,000	298,895	15,617	4670,028	15,627	4671,214	0,011	1,186
15,630	1,000	299,013	15,614	4672,410	15,625	4673,669	0,010	1,260
15,627	1,000	299,102	15,623	4672,782	15,634	4674,000	0,011	1,217

Tab. 14 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 2$ A, $N = 300$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži

Time (s)	U_z (V)	U_R (V)	I_L (A)	I (A)	f (Hz)	U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	I_N (A)	I_C (A)	I_Y (A)	I_{CY} (A)	Δ (A)	δ (%)
50,0	56,504	1,514	523,210	1,735	50,000	66,046	2,006	600,099	601,800	-1,701	2,000	600,000	0,099	0,017
50,2	56,592	1,552	525,129	1,738	50,000	66,046	2,006	600,099	601,800	-1,701	2,000	600,000	0,099	0,017
50,4	56,705	1,571	525,314	1,749	50,000	66,049	2,007	600,093	602,100	-2,007	2,000	600,000	0,093	0,015
50,6	56,793	1,590	525,871	1,757	50,001	66,044	2,005	599,841	601,500	-1,659	2,000	600,000	-0,159	-0,026
50,8	57,044	1,652	527,171	1,758	50,000	66,045	2,006	600,034	601,800	-1,766	2,000	600,000	0,034	0,006
51,0	56,718	1,502	526,243	1,751	50,000	66,055	2,006	600,185	601,800	-1,615	2,000	600,000	0,185	0,031
51,2	56,919	1,608	526,861	1,747	50,000	66,055	2,006	600,185	601,800	-1,615	2,000	600,000	0,185	0,031
51,4	56,793	1,527	526,676	1,755	50,000	66,045	2,007	600,267	602,100	-1,833	2,000	600,000	0,267	0,045
51,6	56,806	1,527	526,923	1,755	50,000	66,047	2,006	600,096	601,800	-1,704	2,000	600,000	0,096	0,016
51,8	56,894	1,527	526,985	1,752	50,000	66,045	2,006	599,929	601,800	-1,871	2,000	600,000	-0,071	-0,012

Tab. 15 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 2$ A, $N = 300$ při harmonickém průběhu a lineární zátěži

U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	P_A (W)	P_B (W)	P_{AR} (W)	P_{BR} (W)
66,046	2,006	600,099	132,493	39630,531	132,504	39634,120	0,010	3,589
66,046	2,006	600,099	132,493	39630,531	132,504	39634,120	0,010	3,589
66,049	2,007	600,093	132,529	39631,777	132,539	39635,414	0,010	3,637
66,044	2,005	599,841	132,411	39612,117	132,423	39615,644	0,011	3,527
66,045	2,006	600,034	132,471	39625,703	132,482	39629,336	0,011	3,633
66,055	2,006	600,185	132,512	39641,543	132,522	39644,959	0,010	3,416
66,055	2,006	600,185	132,512	39641,543	132,522	39644,959	0,010	3,416
66,045	2,007	600,267	132,519	39641,012	132,529	39644,591	0,010	3,579
66,047	2,006	600,096	132,494	39631,195	132,505	39634,683	0,011	3,488
66,045	2,006	599,929	132,447	39619,043	132,458	39622,543	0,011	3,500

Stejně jako při měření s cívkou o $N = 50$, tak i v tomto případě dochází k nepřesnostem. I zde jsou nepřesnosti způsobené chybou přístroje. K největším chybám dochází při měření s proudem $I = 1$ A. Tedy chyba je větší než při měření s $I = 0,5$ A, to můžeme být způsobeno například nastavením špatného rozsahu, nebo okolním vlivem. Porovnáme-li měření cívky o $N = 50$ s měřením cívky o $N = 300$, je patrné, že chyby jsou v případě druhého měření větší. Stejný nárůst velikosti chyb je i v případě měření výkonu. K největším chybám dochází v případě měření s $I = 2$ A.

Rozdíl naměřeného a vypočteného výkonu pomocí proudu na začátku obvodu je minimální. Rozdíl v případě měření proudu na cívce pomocí snímače Amflex je větší, což je způsobeno jak snímačem, tak i měřením na jiném rozsahu.

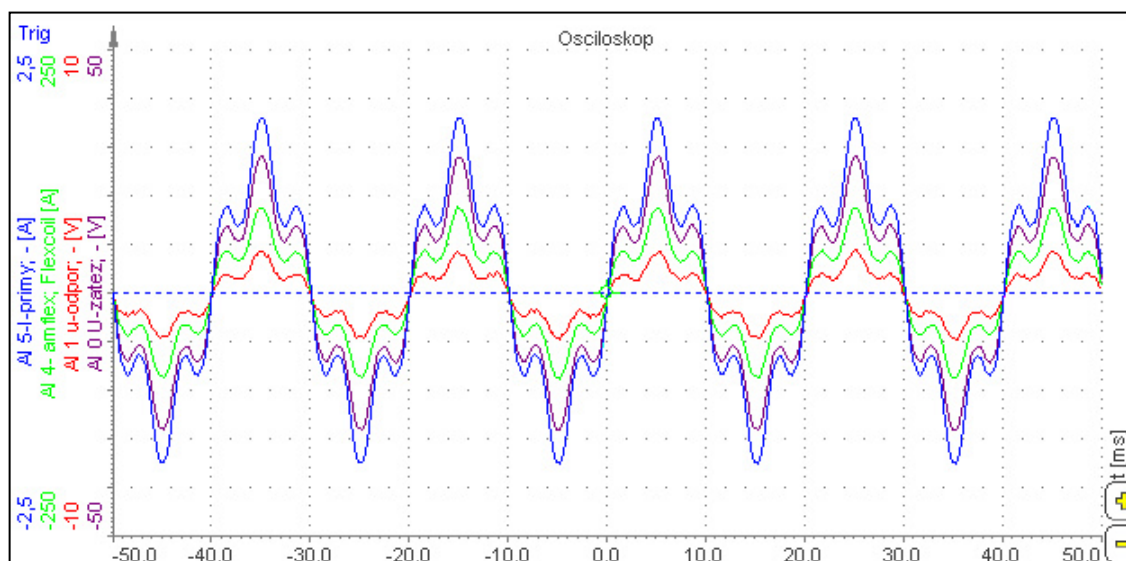
8.2 Měření chyb při neharmonickém průběhu napětí a lineární zátěži

V obvodu byl nahrazený harmonický napěťový signál za neharmonický, čímž obvodem neprochází harmonické napětí. Hlavním cílem je zjistit, zda je chyba měření větší při neharmonickém signálu. Opět měříme s cívkou o $N = 50$ a poté s cívkou o $N = 300$. V obvodu budou postupně nastavovány různé proudy a to $I = 1$ A; 2 A, provedená stejná měření jako v předchozích případech.

8.2.1 Měření na cívce o $N = 50$ při neharmonickém průběhu napětí a lineární zátěži

Měření je prováděno při proudech $I = 1$ A, 2 A. Vzhledem k odporové zátěži nedochází k fázovému posunu. Vlivem neharmonického signálu napětí je signál zkreslený.

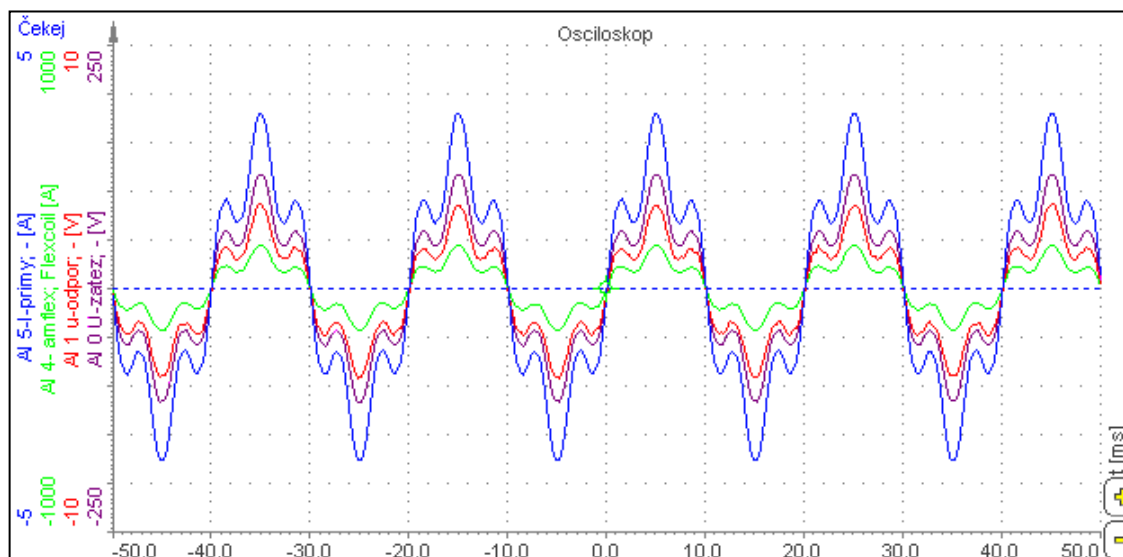
- Měření při $I = 1$ A, $N = 50$, $f = 50$ Hz, neharmonický průběh



Obr. 8.2.1 Průběh neharmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 1$ A, $N = 50$

Průběh signálu je ovlivněn harmonickými, které nastavujeme pomocí zdroje. Na Obr. 8.2.1 může být patrné zkreslení pro průběh napětí na odporu (červená křivka). Toto zkreslení je patrné pouze pro proud $I = 1$ A, v případě většího proudu se zkreslení ztrácí, jak můžeme vidět na Obr. 8.2.2.

- **Měření při $I = 2$ A, $N = 50$, $f = 50$ Hz, neharmonický průběh**



Obr. 8.2.2 Průběh neharmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 2$ A, $N = 50$

Signály průběhu zde nejsou zkreslené, díky velkému proudu v obvodu. Vzhledem k proudu o velikosti $I = 2$ A, měříme v poslední části rozsahu. Měření ovšem není tak přesné jako v případě s cívkou o $N = 300$. V obvodu nevzniká fázový posun, tedy napětí se nepředbíhá před proudem a signály jsou ve fázi.

Tab. 16 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 50$ při neharmonickém průběhu a lineární zátěži

Time (s)	U_z (V)	U_R (V)	I_L (A)	I (A)	f (Hz)	U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	I_N (A)	I_C (A)	I_Y (A)	I_{CY} (A)	Δ (A)	δ (%)
50,0	-2,725	-0,331	-10,210	-0,133	50,001	15,929	1,000	48,949	50,000	-1,051	1,000	50,000	-1,051	-2,102
50,2	-2,436	-0,231	-9,344	-0,132	50,000	15,929	1,000	48,949	50,000	-1,051	1,000	50,000	-1,051	-2,102
50,4	-2,574	-0,237	-8,787	-0,135	50,000	15,929	1,000	48,961	50,000	-1,039	1,000	50,000	-1,039	-2,078
50,6	-2,499	-0,231	-8,725	-0,128	50,000	15,936	1,001	49,009	50,050	-1,041	1,000	50,000	-0,991	-1,982
50,8	-2,675	-0,287	-9,654	-0,122	49,999	15,930	1,001	48,969	50,050	-1,081	1,000	50,000	-1,031	-2,062
51,0	-2,499	-0,218	-9,344	-0,126	49,999	15,930	1,000	48,971	50,000	-1,029	1,000	50,000	-1,029	-2,058
51,2	-2,801	-0,319	-9,220	-0,137	49,999	15,930	1,000	48,971	50,000	-1,029	1,200	50,000	-1,029	-2,058
51,4	-2,662	-0,262	-10,087	-0,141	50,001	15,926	1,000	48,961	50,000	-1,039	1,000	50,000	-1,039	-2,078
51,6	-2,562	-0,193	-9,035	-0,137	50,002	15,931	1,000	48,988	50,000	-1,012	1,000	50,000	-1,012	-2,024
51,8	-2,549	-0,212	-9,159	-0,143	50,001	15,933	1,000	48,978	50,000	-1,022	1,000	50,000	-1,022	-2,044

Tab. 17 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 50$ při neharmonickém průběhu a lineární zátěži

U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	P_A (W)	P_B (W)	P_{AR} (W)	P_{BR} (W)
15,929	1,000	48,949	15,915	779,595	15,926	779,713	0,010	0,118
15,929	1,000	48,949	15,915	779,595	15,926	779,713	0,010	0,118
15,929	1,000	48,961	15,925	779,797	15,935	779,908	0,010	0,111
15,936	1,001	49,009	15,941	780,890	15,951	780,987	0,010	0,098
15,930	1,001	48,969	15,937	779,972	15,947	780,080	0,010	0,108
15,930	1,000	48,971	15,924	780,012	15,935	780,112	0,010	0,101
15,930	1,000	48,971	15,924	780,012	15,935	780,112	0,010	0,101
15,926	1,000	48,961	15,922	779,684	15,932	779,775	0,010	0,091
15,931	1,000	48,988	15,927	780,334	15,938	780,443	0,011	0,110
15,933	1,000	48,978	15,929	780,234	15,939	780,370	0,010	0,136

Tab. 18 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 2$ A, $N = 50$ při neharmonickém průběhu a lineární zátěži

Time (s)	U_z (V)	U_R (V)	I_L (A)	I (A)	f (Hz)	U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	I_N (A)	I_C (A)	I_Y (A)	I_{CY} (A)	Δ (A)	δ (%)
50,0	51,362	1,414	74,568	1,575	50,001	65,751	2,005	98,295	100,250	-1,955	2	100	-1,705	-1,705
50,2	51,299	1,396	74,506	1,582	50,001	65,751	2,005	98,295	100,250	-1,955	2	100	-1,705	-1,705
50,4	51,450	1,458	75,124	1,585	50,000	65,741	2,005	98,336	100,250	-1,914	2	100	-1,664	-1,664
50,6	51,425	1,414	73,330	1,574	50,000	65,733	2,005	98,320	100,250	-1,930	2	100	-1,680	-1,680
50,8	51,475	1,408	73,949	1,596	50,000	65,739	2,004	98,287	100,200	-1,913	2	100	-1,713	-1,713
51,0	51,513	1,433	75,186	1,586	50,000	65,735	2,005	98,351	100,250	-1,899	2	100	-1,649	-1,649
51,2	51,450	1,377	73,949	1,587	50,000	65,735	2,005	98,351	100,250	-1,899	2	100	-1,649	-1,649
51,4	51,689	1,471	75,310	1,604	50,001	65,723	2,005	98,323	100,250	-1,927	2	100	-1,677	-1,677
51,6	51,563	1,408	74,134	1,575	50,001	65,752	2,004	98,269	100,200	-1,931	2	100	-1,731	-1,731
51,8	51,638	1,421	75,434	1,588	50,000	65,751	2,006	98,326	100,300	-1,974	2	100	-1,674	-1,674

Tab. 19 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 2$ A, $N = 50$ při neharmonickém průběhu a lineární zátěži

U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	P_A (W)	P_B (W)	P_{AR} (W)	P_{BR} (W)
65,751	2,005	98,295	131,798	6462,329	131,809	6462,957	0,011	0,628
65,751	2,005	98,295	131,798	6462,329	131,809	6462,957	0,011	0,628
65,741	2,005	98,336	131,797	6464,041	131,807	6464,703	0,010	0,662
65,733	2,005	98,320	131,781	6461,950	131,792	6462,822	0,011	0,873
65,739	2,004	98,287	131,757	6460,233	131,768	6461,274	0,011	1,041
65,735	2,005	98,351	131,807	6463,864	131,818	6465,088	0,011	1,224
65,735	2,005	98,351	131,807	6463,864	131,818	6465,088	0,011	1,224
65,723	2,005	98,323	131,759	6461,005	131,771	6462,107	0,011	1,101
65,752	2,004	98,269	131,783	6460,777	131,794	6461,429	0,012	0,652
65,751	2,006	98,326	131,880	6464,449	131,890	6465,052	0,011	0,603

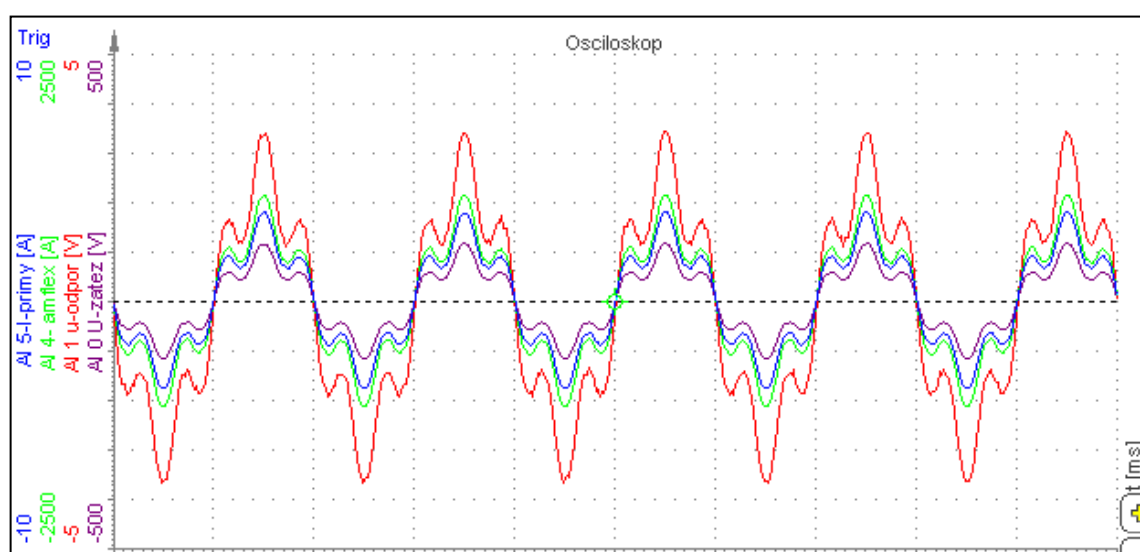
Pro měření neharmonického průběhu s cívkou $N = 50$, bylo měření prováděno při proudech o velikosti $I = 1$ a 2 A. Z důvodů velkých nepřesností při měření s proudem o velikosti $I = 0,5$ A. Porovnáním daného měření pomocí Tab. 16 a Tab. 18 zjistíme, že měření při vyšším proudu je více přesné, neboť měříme v poslední části rozsahu. Chyby měření jsou počítané z proudu násobeného počtem závitů cívky. Rozdíl naměřeného a vypočteného proudu na cívce je při měření $I = 1$ A cca 1A, v případě měření s $I = 2$ A cca 2A. I v případě výkonů, se chyba měření s narůstajícím proudem zvyšuje, jak dokazuje Tab. 17 a Tab. 19

Rozdíl výkonů v obvodu je stále nepatrný a stejný jako v předchozích případech. Při měření a výpočtu výkonu na měřicí cívce docházelo k chybám vlivem proudového snímače Amflex. Rozdíl je větší než-li v případě měření s harmonickým průběhem a lineární zátěží na cívce o $N = 50$.

8.2.2 Měření na cívce o $N = 300$ při neharmonickém průběhu napětí a lineární zátěži

Pro zjištění zda větší počet závitů zvýší chybu měření byla využita cívka o počtu závitů $N = 300$. Nastaveny jsou opět stejné parametry: $f = 50$ Hz, $I = 1$ A; 2 A.

- **Neharmonický průběh. Měření při $I = 1$ A, $N = 300$, $f = 50$ Hz**

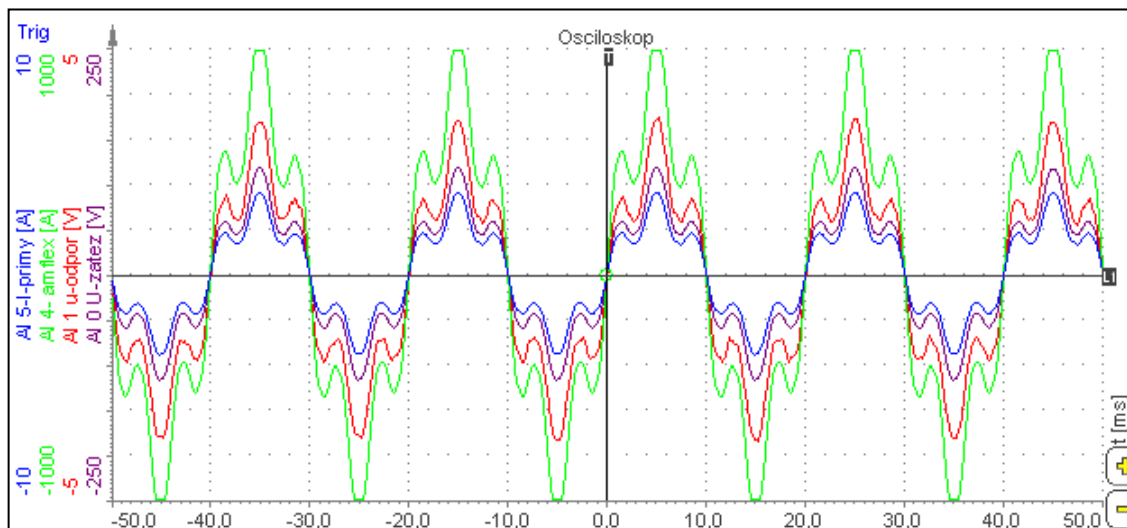


Obr. 8.2.3 Průběh neharmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 1$ A, $N = 300$

V grafu je patrné zkreslení napěťového signálu na odporu, toto zkreslení je způsobeno nízkým proudem. Zkreslení je větší než v případě s cívkou o $N = 50$. Je patrné, že cívka ovlivňuje průběh signálu.

Vypočtená relativní chyba je zde větší než v případě sinusového signálu, proto lze říct, že průběh signálu má vliv na měření. Relativní chyba se zde projevuje do 1%. Tato skutečnost je patrná z kompletních naměřených dat.

- Neharmonický průběh. Měření při $I = 2 \text{ A}$, $N = 300$, $f = 50 \text{ Hz}$



Obr. 8.2.4 Průběh neharmonického signálu obvodem s lineární zátěží při $I = 1 \text{ A}$, $N = 300$

V grafu dochází ke zkreslení napěťového signálu na odporu. Signály jsou ve fázi, nedochází k fázovému posunu. Díky většímu proudu v obvodu není zkreslení napětí na odporu tak patrné jako na Obr. 8.2.3.

Tab. 20 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 300$ při neharmonickém průběhu a lineární zátěži

Time (s)	U_z (V)	U_R (V)	I_L (A)	I (A)	f (Hz)	U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	I_N (A)	I_C (A)	I_Y (A)	I_{CY} (A)	Δ (A)	δ (%)
50,0	-11,501	-0,838	-205,447	-0,663	50,000	16,387	1,000	299,077	300,000	-0,923	1,000	300,000	-0,923	-0,308
50,2	-11,388	-0,781	-204,519	-0,661	50,000	16,387	1,000	299,077	300,000	-0,923	1,000	300,000	-0,923	-0,308
50,4	-11,451	-0,800	-205,324	-0,657	49,999	16,382	1,000	299,029	300,000	-0,971	1,000	300,000	-0,971	-0,324
50,6	-11,438	-0,825	-204,767	-0,660	50,000	16,383	1,001	299,115	300,300	-1,185	1,000	300,000	-0,885	-0,295
50,8	-11,639	-0,875	-206,933	-0,670	50,001	16,376	1,000	299,025	300,000	-0,975	1,000	300,000	-0,975	-0,325
51,0	-11,501	-0,813	-206,871	-0,676	50,001	16,372	1,001	299,016	300,300	-1,284	1,000	300,000	-0,984	-0,328
51,2	-11,513	-0,832	-206,128	-0,667	50,001	16,372	1,001	299,016	300,300	-1,284	1,000	300,000	-0,984	-0,328
51,4	-11,463	-0,819	-205,447	-0,658	50,000	16,376	1,001	299,049	300,300	-1,251	1,000	300,000	-0,951	-0,317
51,6	-11,438	-0,775	-205,014	-0,650	50,000	16,364	1,000	298,940	300,000	-1,060	1,000	300,000	-1,060	-0,353
51,8	-11,539	-0,844	-205,695	-0,676	50,001	16,365	1,000	299,014	300,000	-0,986	1,000	300,000	-0,986	-0,329

Tab. 21 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 300$ při neharmonickém průběhu a lineární zátěži

U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	P_A (W)	P_B (W)	P_{AR} (W)	P_{BR} (W)
16,387	1,000	299,077	16,386	4899,847	16,395	4901,046	0,009	1,199
16,387	1,000	299,077	16,386	4899,847	16,395	4901,046	0,009	1,199
16,382	1,000	299,029	16,377	4897,363	16,387	4898,557	0,009	1,194
16,383	1,001	299,115	16,384	4899,023	16,393	4900,261	0,009	1,238
16,376	1,000	299,025	16,370	4895,604	16,380	4896,760	0,009	1,156
16,372	1,001	299,016	16,375	4894,446	16,385	4895,568	0,010	1,122
16,372	1,001	299,016	16,375	4894,446	16,385	4895,568	0,010	1,122
16,376	1,001	299,049	16,376	4896,321	16,385	4897,367	0,009	1,046
16,364	1,000	298,940	16,355	4890,666	16,364	4891,751	0,009	1,086
16,365	1,000	299,014	16,361	4892,343	16,370	4893,432	0,009	1,090

Tab. 22 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 2$ A, $N = 300$ při neharmonickém průběhu a lineární zátěži

Time (s)	U_i (V)	U_R (V)	I_L (A)	I (A)	f (Hz)	U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	I_N (A)	I_C (A)	I_Y (A)	I_{CY} (A)	Δ (A)	δ (%)
50,0	-52,538	-1,639	-478,346	-1,566	50,000	66,067	2,005	599,867	601,500	-1,633	2,000	600,000	-0,133	-0,022
50,2	-52,952	-1,795	-483,358	-1,591	50,000	66,067	2,005	599,867	601,500	-1,633	2,000	600,000	-0,133	-0,022
50,4	-52,827	-1,720	-481,873	-1,580	50,000	66,047	2,006	600,024	601,800	-1,776	2,000	600,000	0,024	0,004
50,6	-52,764	-1,695	-482,987	-1,578	50,001	66,083	2,004	599,479	601,200	-1,721	2,000	600,000	-0,521	-0,087
50,8	-53,154	-1,739	-481,316	-1,575	50,000	66,081	2,005	599,811	601,500	-1,689	2,000	600,000	-0,189	-0,031
51,0	-53,116	-1,745	-484,163	-1,585	50,000	66,082	2,004	599,659	601,200	-1,541	2,000	600,000	-0,341	-0,057
51,2	-52,839	-1,632	-483,730	-1,587	50,000	66,082	2,004	599,659	601,200	-1,541	2,000	600,000	-0,341	-0,057
51,4	-52,978	-1,714	-484,349	-1,591	50,001	66,060	2,004	599,664	601,200	-1,536	2,000	600,000	-0,336	-0,056
51,6	-52,877	-1,664	-485,710	-1,600	50,000	66,050	2,005	599,816	601,500	-1,684	2,000	600,000	-0,184	-0,031
51,8	-53,015	-1,645	-482,183	-1,578	50,000	66,046	2,005	599,838	601,500	-1,662	2,000	600,000	-0,162	-0,027

Tab. 23 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 2$ A, $N = 300$ při neharmonickém průběhu a lineární zátěži

U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	P_A (W)	P_B (W)	P_{AR} (W)	P_{BR} (W)
66,067	2,005	599,867	132,466	39628,109	132,478	39631,208	0,012	3,099
66,067	2,005	599,867	132,466	39628,109	132,478	39631,208	0,012	3,099
66,047	2,006	600,024	132,488	39626,613	132,498	39629,941	0,010	3,328
66,083	2,004	599,479	132,400	39612,238	132,413	39615,489	0,013	3,251
66,081	2,005	599,811	132,510	39632,914	132,521	39636,148	0,011	3,234
66,082	2,004	599,659	132,444	39623,285	132,456	39626,400	0,012	3,115
66,082	2,004	599,659	132,444	39623,285	132,456	39626,400	0,012	3,115
66,060	2,004	599,664	132,392	39610,324	132,402	39613,557	0,010	3,233
66,050	2,005	599,816	132,419	39614,137	132,430	39617,673	0,011	3,536
66,046	2,005	599,838	132,424	39613,664	132,434	39617,040	0,010	3,376

Při měření s cívkou o $N = 300$ dochází k menším relativním chybám měření než v případě s cívkou o $I = 50$, to je způsobeno přepnutím rozsahů. Rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými výkony je zde patrný, v případě s větším proudem je rozdíl mnohem vyšší. Porovnáním měření výkonu s cívkou $N = 50$ a měřením s cívkou $N = 300$ je patrné, že chyby měření jsou větší při větším počtu závitů.

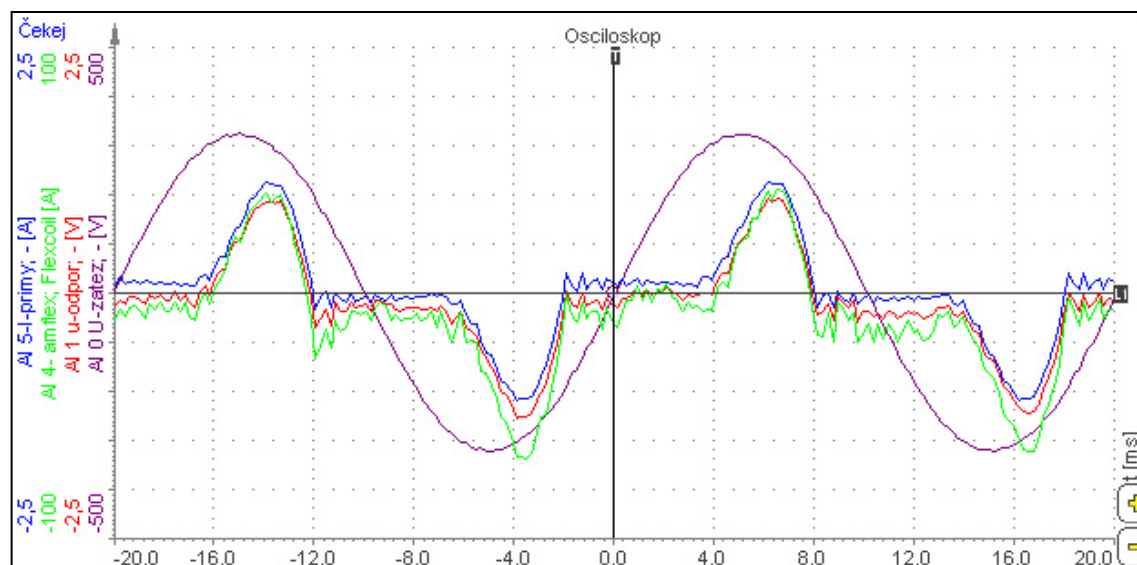
I zde se rozdíl výkonu v obvodu nemění a je stále stejný jako v předchozích případech. Velké chyby vznikají při měření výkonu na cívce, kdy je chyba působena jak proudovým snímačem tak i měřicím rozsahem.

8.3 Měření chyb při harmonickém průběhu napětí a nelineární zátěži

Pro měření s neharmonickou zátěží byl využit zdroj z PC Autocont jako zátěž. Měření probíhalo při naběhnutém zdroji počítače, tedy za ustálených hodnot proudu. Vzhledem k dané zátěži, nebylo, v obvodu možné dosáhnout požadovaného proudu. Ze zdroje do obvodu přicházel proud $I = 1$ A, ovšem vlivem zátěže se proud I snížil na hodnotu cca $I = 0,5$ A. Tuto skutečnost bude třeba brát v zřetel, při porovnávání všech daných výsledků. Naproti tomu napětí v obvodu bylo konstantní tedy $U = 230$ V, což v předchozích případech neplatí, neboť zde se napětí měnilo.

8.3.1 Měření na cívce o $N = 50$ při harmonickém průběhu napětí a nelineární zátěži

Vzhledem k dané zátěži, bylo provedeno pouze měření při $I = 1$ A, neboť vlivem zátěže proud klesá cca na $I = 0,5$ A. Měření při vyšších proudech vykazovalo stejné známky chování obvodu, i stejné parametry, jako při měření s proudem $I = 1$ A.



Obr. 8.3.1 Průběh harmonického signálu obvodem s nelineární zátěží při $I = 1$ A, $N = 300$

Průběh napětí na zátěži je zde sinusový (fialová křivka), kdežto napětí na odporu, přímý proud a proud naměřený pomocí Amflexu, jsou zkreslené. Toto zkreslení je způsobeno nelineární zátěží. Z obrázku je patrný fázový posun, tedy napětí se předbíhá proudem. Zkreslení signálů je zde větší, ale nepatrné, než v případě měření s cívkou o $N = 300$, jež můžeme vidět na Obr. 8.3.2.

Tab. 24 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 50$ při harmonickém průběhu a nelineární zátěži – Ustálený chod PC

Time (s)	U_z (V)	U_R (V)	I_L (A)	I (A)	f (Hz)	U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	I_N (A)	I_C (A)	I_Y (A)	I_{CY} (A)	Δ (A)	δ (%)
50,00	277,340	0,889	39,003	1,043	50,001	229,369	0,496	25,933	24,800	1,133	0,493	24,650	1,283	5,205
50,20	277,805	0,939	42,099	1,050	50,000	229,369	0,496	25,933	24,800	1,133	0,493	24,650	1,283	5,205
50,40	277,365	0,833	37,146	1,036	50,000	229,391	0,496	26,260	24,800	1,460	0,493	24,650	1,610	6,531
50,60	277,491	0,945	42,718	1,055	50,000	229,398	0,500	26,071	25,000	1,071	0,493	24,650	1,421	5,765
50,80	277,214	0,826	34,670	1,042	50,000	229,429	0,496	26,087	24,800	1,287	0,493	24,650	1,437	5,830
51,00	277,843	0,858	35,908	1,028	50,000	229,372	0,496	25,384	24,800	0,584	0,493	24,650	0,734	2,978
51,20	277,189	0,983	48,909	1,056	50,000	229,372	0,496	25,384	24,783	0,601	0,493	24,650	0,734	2,980
51,40	277,013	0,858	39,003	1,035	50,001	229,349	0,496	25,245	24,800	0,445	0,493	24,650	0,595	2,414
51,60	277,529	0,864	37,765	1,031	50,001	229,416	0,496	25,875	24,800	1,075	0,493	24,650	1,225	4,970
51,80	276,649	0,820	31,574	1,017	50,000	229,403	0,497	26,084	24,850	1,234	0,493	24,650	1,434	5,817

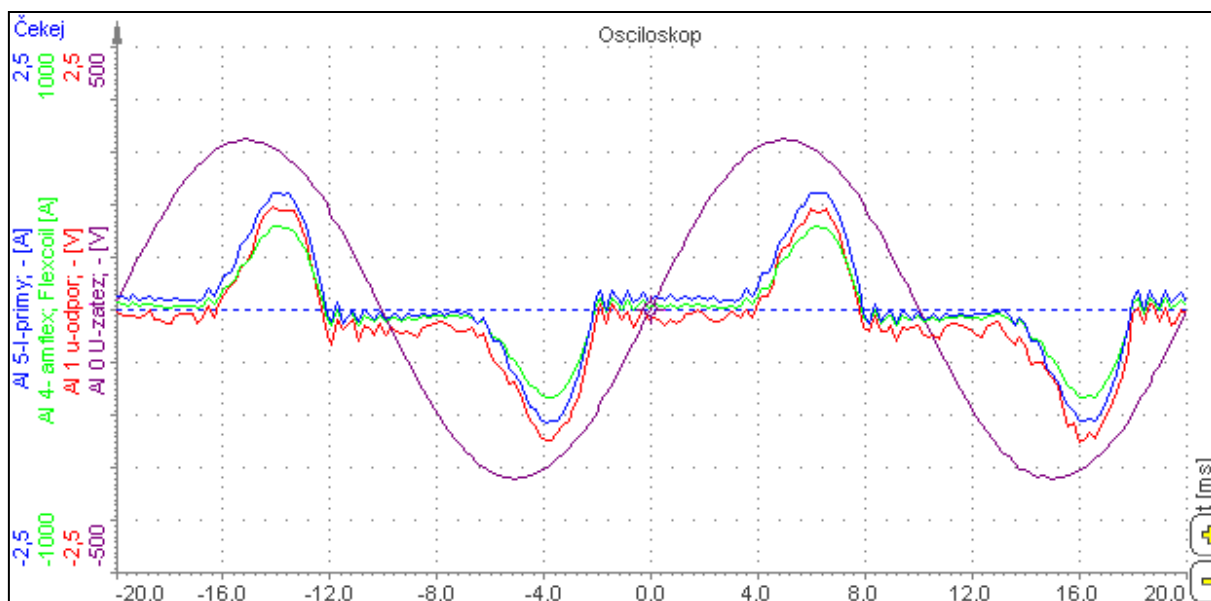
Tab. 25 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 50$ při harmonickém průběhu a nelineární zátěži – Ustálený chod PC

U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	P_A (W)	P_B (W)	P_{AR} (W)	P_{BR} (W)
229,369	0,496	25,933	87,208	4052,558	113,780	5948,270	26,572	1895,713
229,369	0,496	25,933	87,208	4052,558	113,780	5948,270	26,572	1895,713
229,391	0,496	26,260	87,169	4020,629	113,717	6023,871	26,549	2003,241
229,398	0,500	26,071	88,084	4080,201	114,781	5980,613	26,697	1900,412
229,429	0,496	26,087	87,393	4180,795	113,906	5984,999	26,513	1804,204
229,372	0,496	25,384	87,155	3956,914	113,691	5822,494	26,536	1865,580
229,372	0,496	25,384	87,155	3956,914	113,691	5822,494	26,536	1865,580
229,349	0,496	25,245	87,271	4011,757	113,757	5789,947	26,485	1778,190
229,416	0,496	25,875	87,155	4018,949	113,699	5936,168	26,544	1917,219
229,403	0,497	26,084	87,430	4102,879	113,978	5983,779	26,549	1880,900

V případě nelineární zátěže dochází k velmi vysokým chybám měření, to je způsobeno nelinearitou zátěže. Porovnáme-li toto měření s měřením s lineární zátěží, chyby jsou značně rozdílné. Tato skutečnost je způsobena rozsahy, chybou přesnosti přístroje a nelinearitou zátěže. Rozdíly výkonů jsou značně vysoké, vzhledem k předchozím chybám měření.

Vlivem nelineární zátěže, vzniklo velké zkreslení obvodu a výkony tedy nelze porovnávat s předchozími měřeními. Chyba na cívce je mnohonásobně větší.

8.3.2 Měření na cívce o $N = 300$ při harmonickém průběhu napětí a nelineární zátěži



Obr. 8.3.2 Průběh harmonického signálu obvodem s nelineární zátěží při $I = 1$ A, $N = 300$

Stejně jako v předchozím případě, i zde dochází k fázovému posunu. Napětí na zátěži (fialová křivka) se předbíhá před ostatními signály. Zkreslení signálů vzniká zapojením nelineární zátěže. Proudový signál Amflex je v případě měření s cívkou o $N = 300$ méně zkreslený, nežli daný signál při měření s cívkou o $N = 50$. Toto je způsobeno lepším nastavením rozsahů. Rozdíly v daných signálech jsou nepatrné, způsobené rozsahy měřicích přístrojů.

Tab. 26 Tabulka vzorků proudů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 300$ při harmonickém průběhu a nelineární zátěži – Ustálený chod PC

Time (s)	U_z (V)	U_R (V)	I_L (A)	I (A)	f (Hz)	U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	I_N (A)	I_C (A)	I_Y (A)	I_{CY} (A)	Δ (A)	δ (%)
50,00	310,909	0,182	84,197	0,332	50,001	229,357	0,496	147,779	148,800	-1,021	0,500	150,000	-2,221	-1,481
50,20	311,386	0,182	82,959	0,330	50,000	229,357	0,496	147,779	148,800	-1,021	0,500	150,000	-2,221	-1,481
50,40	311,349	0,188	83,578	0,339	50,000	229,382	0,495	147,727	148,500	-0,773	0,500	150,000	-2,273	-1,515
50,60	310,821	0,169	78,626	0,328	50,000	229,410	0,495	147,580	148,500	-0,920	0,500	150,000	-2,420	-1,613
50,80	311,198	0,295	92,865	0,336	50,000	229,400	0,496	147,840	148,800	-0,960	0,500	150,000	-2,160	-1,440
51,00	311,148	0,270	91,007	0,332	50,001	229,395	0,496	147,946	148,800	-0,854	0,500	150,000	-2,054	-1,369
51,20	311,060	0,194	82,340	0,324	50,001	229,395	0,496	147,946	148,800	-0,854	0,500	150,000	-2,054	-1,369
51,40	311,286	0,201	84,197	0,329	50,001	229,358	0,495	147,835	148,500	-0,665	0,500	150,000	-2,165	-1,443
51,60	312,028	0,201	86,055	0,329	50,001	229,415	0,496	147,634	148,800	-1,166	0,500	150,000	-2,366	-1,577
51,80	311,738	0,151	81,721	0,331	50,000	229,400	0,496	147,805	148,800	-0,995	0,500	150,000	-2,195	-1,463

Tab. 27 Porovnávání výkonů, pro měření při $f = 50$ Hz, $I = 1$ A, $N = 300$ při harmonickém průběhu a nelineární zátěži – Ustálený chod PC

U_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_{LRMS} (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	P_A (W)	P_B (W)	P_{AR} (W)	P_{BR} (W)
228,840	0,773	38,644	137,965	6605,658	176,892	8843,331	38,927	2237,674
228,840	0,773	38,644	137,965	6605,658	176,892	8843,331	38,927	2237,674
228,809	0,785	39,453	140,411	6754,533	179,597	9027,144	39,186	2272,611
228,783	0,780	39,408	139,325	6667,284	178,513	9015,974	39,188	2348,689
229,479	0,563	29,287	99,485	4692,077	129,259	6720,772	29,773	2028,695
229,341	0,526	27,417	92,931	4350,704	120,743	6287,766	27,812	1937,061
229,341	0,526	27,417	92,931	4350,704	120,743	6287,766	27,812	1937,061
229,391	0,527	27,601	93,201	4385,278	120,920	6331,411	27,719	1946,133
229,328	0,519	27,062	91,591	4290,172	118,977	6206,098	27,386	1915,926
229,281	0,527	27,415	93,134	4359,786	120,899	6285,797	27,765	1926,011

Při měření s cívkou o $N = 300$ jsou chyby menší a v mezích třídy přesnosti, neboť měříme s lepším rozsahem. I zde však vznikají značné chyby, způsobené rozsahem, třídou přesnosti přístroje, tak i nelinearitou zátěže. Tyto chyby se projevují i při měření výkonu, který je značně rozdílný od vypočteného výkonu.

9 Zhodnocení měření

9.1 Testování zátěží

Jako první byly testovány lineární zátěže, tedy odporová a RC zátěž. Při použití RC zátěže docházelo k fázovému posunu mezi napětím a proudem. V případě odporové zátěže byl posun zanedbatelný. Napětí při odporové a RC zátěži se měnilo, podle nastaveného proudového omezení, s narůstajícím proudem narůstalo i napětí. Prvky nejsou napájené ze sítě, tedy nemají konstantní odběr. K měření nelineární zátěže bylo testováno více přístrojů, neboli jejich zdrojů, zdroj PC Alfa, zdroj PC Autocont a zdroj notebooku. Nejlepší vlastnosti pro další měření vykazoval zdroj počítače PC Autocont. Při testování nelineární zátěže docházelo k fázovému posunu mezi napětím a proudem. Proud vykazoval značné zkreslení, což je způsobeno nelinearitou zátěže. Vzhledem k tomu, že na zátěži byl využit stolní počítač, proudový odběr ze sítě byl konstantní, stejně jako napětí.

9.2 Měření s harmonickým průběhem napětí a lineární zátěží

Při měření harmonického průběhu bylo využito cívek o $N = 50$ a $N = 300$ závitů. Z měření vyplynulo, že hledané chyby závisí na procházejícím proudu v obvodu a částečně může záviset i na počtu závitů cívky. Při nízkém proudu je mnohem větší chyba měření a se zvětšujícím se proudem se chyba zmenšuje. To platí pro měření s cívkou $N = 50$ a také pro měření s cívkou $N = 300$, což je dáno použitým měřicím rozsahem. Po přepočtu chyb je patrná závislost na měřicím rozsahu. Dané chyby jsou stále menší, než udávaná třída přesnosti. Přesto nemůže být vyloučena závislost na počtu závitů měřicí cívky. Vypočtená třída přesnosti je zde větší v závislosti na rozsahu, ale měření v první šestině měřicího rozsahu v případě měření s proudem $I = 0,5$ A nelze považovat za přesné. Tedy daná chyba je zde způsobena rozsahem, ale je možné, že ji ovlivňují i další chyby měření. Předpokládá se, že při dalším měření s cívkou o ještě větším počtu závitů, než je použito, by byla prokázána závislost na počtu závitů. Rozdíl v chybách by byl mnohem více patrný.

Relativní chyba v případě měření o $N = 50$ a $I = 1$ A se pohybuje okolo $\delta = 0,2 - 0,7$ %. Zaměníme-li cívku o velikosti $N = 50$ za cívku $N = 300$, bude relativní chyba při stejném proudu a tedy $I = 1$ A rovna $\delta = 0,2 - 0,5$ %, tedy chyba je o poznání menší než v případě cívky s 300 závity. Dewetron využívá měřicí kartu ORION-0816-1000, tato karta má dle daných údajů v katalogovém listu velmi dobrou přesnost, tedy chyba způsobená měřicí kartou je velmi malá a proto ji můžeme zanedbat. Ovšem měřicí snímač Amflex má třídu přesnosti 1 %, což se dá považovat za velkou chybu, která ovlivňuje měření.

Dle měření a následných výpočtů nelze dokázat, že počet závitů cívky ovlivňuje měření. Zásadní vliv na měření má daný rozsah měřicího přístroje, třída přesnosti a průběh napětí v obvodu.

Tab. 28 Porovnání chyb s vypočtenou relativní chybou přístroje, při harmonickém průběhu a lineární zátěži

$N = 50$	$N = 50$
$I = 0,5 \text{ A}$, relativní chyba $\delta = 1 \%$	Vypočtená relativní chyba $\delta = 7 \%$
$I = 1 \text{ A}$, relativní chyba $\delta = 0,5 \%$	Vypočtená relativní chyba $\delta = 4 \%$
$I = 2 \text{ A}$, relativní chyba $\delta = 0,1 \%$	Vypočtená relativní chyba $\delta = 2,5 \%$
$N = 300$	$N = 300$
$I = 0,5 \text{ A}$, relativní chyba $\delta = 1 \%$	Vypočtená relativní chyba $\delta = 3 \%$
$I = 1 \text{ A}$, relativní chyba $\delta = 0,5 \%$	Vypočtená relativní chyba $\delta = 2 \%$
$I = 2 \text{ A}$, relativní chyba $\delta = 0,1 \%$	Vypočtená relativní chyba $\delta = 2 \%$

Výpočet pro tabulky porovnání chyb. Výpočet je uveden pro 1. řádek Tab. 28.

Vzorec pro výpočet chyby dle rozsahu:

$$\delta_p = \frac{X_{Roz}}{X_{Mer}} \cdot T_p = \frac{150}{25} \cdot 1 = 6\% \quad (24)$$

Měření probíhalo na měřicím rozsahu přístroje o velikosti $X_{Roz} = 150 \text{ A}$, při měření proudu $I = 0,5 \text{ A}$ v obvodu. Počet závitů cívky $N = 50$, tedy procházející proud měřicí cívkou je roven $I = 25 \text{ A}$. Tedy měřená hodnota X_{Mer} je 25 A . Každý měřicí přístroj má danou třídu přesnosti výrobcem, v tomto případě je $T_p = 1 \%$. Pomocí těchto údajů byla vypočtena proměnná relativní chyba, která je závislá na měřicím rozsahu. Celkovou relativní chybu δ vypočteme jako součet chyby přístroje δ_V , která je uváděna výrobcem, a proměnné chyby δ_p , která je dána měřicím rozsahem.

$$\delta = \delta_V + \delta_p = 1 + 6 = 7\% \quad (25)$$

Pro každé měření bylo využito jiných měřicích rozsahů. Pro výpočty relativních chyb bylo využito hodnot z následující tabulky. Pro určení relativní chyby při měření s harmonickým průběhem a nelineární zátěží, bylo využito stejných parametrů jako v případě měření s harmonickým průběhem a lineární zátěží. Parametry jsou zde stejné, tedy je zde stejná i relativní chyba.

Tab. 29 Tabulka rozsahů pro výpočty relativních chyb

Měřicí rozsah	$X_{Roz} = 150 \text{ A}, N = 50$	$X_{Roz} = 300 \text{ A}, N = 300$	$X_{Roz} = 1000 \text{ A}, N = 300$
Harmonický průběh s ne/lineární zátěží			
$I = 0,5 \text{ A}$	25 A => 1/6 rozsahu	150 A => 1/2 rozsahu	-
$I = 1 \text{ A}$	50 A => 1/3 rozsahu	300 A => plný rozsah	-
$I = 2 \text{ A}$	100 A => 2/3 rozsahu	-	600 A => 3/5 rozsahu
Neharmonický průběh			
$I = 1 \text{ A}$	50 A => 1/3 rozsahu	300 A => plný rozsah	-
$I = 2 \text{ A}$	100 A => 2/3 rozsahu	-	600 A => 3/5 rozsahu

9.3 Měření s neharmonickým průběhem napětí a lineární zátěží

Při měření s neharmonickým průběhem je chyba větší než v případě s harmonickou zátěží. V případě měření s $I = 1 \text{ A}$ je měření prováděno v první třetině rozsahu. Vypočtená třída přesnosti je rovna 3%, vypočtená relativní chyba je 2,5%, pro měření s cívkou o $N = 50$. V případě měření v poslední třetině rozsahu je relativní chyba rovna 0,5%, pro měření s cívkou o $N = 300$ závitů. Tedy je zde zcela jasný vliv měřicího rozsahu, ovšem stejně jako v předchozím případě nemůže být s jistotou vyloučeno, že danou chybu neovlivňují další vlivy, jako je třeba cívka o určitém počtu závitů.

Měříme-li s proudem $I = 2 \text{ A}$, cívkou $N = 50$ je vypočtená třída přesnosti rovna 2,5%, relativní chyba je zde dvou procentní. Toto měření je prováděno v druhé třetině měřicího rozsahu. Díky těmto skutečnostem je předpokládáno, že se zde vyskytuje vliv měřicí cívky. V případě cívky o $N = 300$ je daná chyba menší, a nepřibližuje se k dané třídě přesnosti, která je v tomto případě 2,66%. Měření je prováděno v třetí pětině rozsahu tedy za první polovinou rozsahu. Vzhledem k nízké relativní chybě, by mohl mít počet závitů cívky vliv na měření.

Porovnáním měření při $N = 50$ a $N = 300$ při proudu $I = 1 \text{ A}$ jsem bylo zjištěno, že rozdíl daných chyb, je velký, relativní chyba δ pro $N = 50$ je rovna 2,5% a relativní chyba δ pro $N = 300$ je rovna 0,5% . Rozdíl je tedy zhruba 2%. V případě harmonického průběhu nebyl procentuální rozdíl žádný.

Tab. 30 Porovnání chyb s vypočtenou relativní chybou přístroje, při neharmonickém průběhu a lineární zátěží

$N = 50$	$N = 50$
$I = 1 \text{ A}$, relativní chyba $\delta = 2,5 \%$	Vypočtená relativní chyba $\delta = 4 \%$
$I = 2 \text{ A}$, relativní chyba $\delta = 2 \%$	Vypočtená relativní chyba $\delta = 2,5 \%$
$N = 300$	$N = 300$
$I = 1 \text{ A}$, relativní chyba $\delta = 0,5 \%$	Vypočtená relativní chyba $\delta = 2 \%$
$I = 2 \text{ A}$, relativní chyba $\delta = 0,1 \%$	Vypočtená relativní chyba $\delta = 2,66 \%$

9.4 Měření s harmonickým průběhem napětí a nelineární zátěží

Následující měření lze porovnat s měřením proudů a výkonu s harmonickým průběhem a harmonickou zátěží. Měření s neharmonickou zátěží je záměrně porovnáno s prvním měřením (Měření s harmonickým průběhem a harmonickou zátěží), neboť zde je téměř stejný proud cca 0,5 A. Po porovnání chyb měření při 50 a 300 závitů je zcela patrné, že v případě nižšího počtu závitů je mnohem větší chyba, zde i přes 5%. Tato skutečnost v podstatě dokazuje, že měřit neharmonickou zátěž při tak nízkém měřicím rozsahu je nepřesné a nespolehlivé. Je předpokládáno, že je chyba způsobena i počtem závitů cívky, neboť chyba je skoro stejně velká jako vypočtená třída přesnosti.

Po srovnání měření s harmonickou zátěží a neharmonickou zátěží za harmonického průběhu, je zcela zjevné, že při měření záleží i na použité zátěži. Při použití neharmonické zátěže, se chyby zvětší a měření je více nepřesné. Zvýšení hodnoty chyb je zcela patrné, vezmeme-li v úvahu, že v případě harmonické zátěže se jednalo o chyby v třídě přesnosti do 1%.

Tab. 31 Porovnání chyb s vypočtenou relativní chybou přístroje, při měření s harmonickým průběhem a nelineární zátěží

$N = 50$	$N = 50$
$I = 0,5$ A, relativní chyba $\delta =$ přes 5 %	Vypočtená relativní chyba $\delta = 7$ %
$N = 300$	$N = 300$
$I = 0,5$ A, relativní chyba $\delta = 2$ %	Vypočtená relativní chyba $\delta = 3$ %

10 Závěr

Je zcela patrné, že správnost měření je ovlivněna více faktory. Mezi základní faktory patří správný měřicí rozsah. Při měření nízkých proudů, se relativní chyba měření projevovala mnohem více, než při vyšších proudech. Tato skutečnost je patrná u měření, jak s harmonickým průběhem napětí, tak i s neharmonickým průběhem napětí. V případě neharmonického průběhu, se jedná o zřetelnější jev.

Chyby jsou různě velké, v závislosti na harmonickém průběhu, či neharmonickém průběhu napětí, což je další ze základních faktorů, ovlivňující správnost měření. Velikost chyb je také ovlivněna zátěží v obvodu. Bude-li na zátěži nelineární zátěž, budou chyby větší, nežli v případě měření s nelineární zátěží.

Z celého měření vyplývá, že je důležité dbát na správný rozsah měřicího přístroje. Měření je ovlivněno průběhem proudu a napětí, procházející obvodem. Počet závitů může ovlivnit měření a jeho následné chyby, jedná-li se o dvě cívky s velkým rozdílem počtu závitů. Cívka s počtem závitů $N = 50$ vykazuje větší chybu než cívka s $N = 300$. To může být způsobeno nastavením měřicích rozsahů na přístrojích.

Celkové měření bylo ovlivněno rozsahy a třídou přesnosti přístrojů. Celkové výsledky byly přesnější, pokud jsme měřili s vyššími proudy na správném rozsahu. V případě měření s harmonickým průběhem a lineární zátěží bylo měření přesnější s menší cívkou. Při měření s neharmonickým průběhem docházelo k větším chybám na cívce o $N = 50$. Stejně tomu bylo i v případě nelineární zátěže. Velkou část chyb způsobuje měřicí rozsah a třída přesnosti přístrojů. Vliv počtu závitů se při daném měření neprokázal. Patrné ovšem je, že měření neovlivní chybějící či přebývající závit na cívce.

Rozdíl naměřeného a vypočteného výkonu, určeného pomocí proudu na začátku obvodu, je shodný v případě měření s harmonickým průběhem a neharmonickým průběhem za lineární zátěže. Výkony naměřené a vypočtené při nelineární zátěži nelze srovnat. Rozdíly výkonů, určených pomocí proudu naměřeného na cívce, se zvětšují s narůstajícím proudem. To je způsobeno chybou proudového snímače, třídou přesnosti a nastavovanými rozsahy.

Touto prací byl dokázán vliv měřicího rozsahu, závislost měření na protékajícím napětí a vliv zátěže na chyby měření. Vliv počtu závitů cívky na měření, prokázán nebyl, lze jej dále zkoumat a dokázat možnost vlivu na měření. Pro další měření, by bylo třeba určit dané hodnoty proudu a rozsahy tak, aby způsobovali co nejmenší chybu. Poté by bylo možné sledovat vliv počtu závitů cívky na měření.

11 Použitá literatura

[1] BARTUŠEK, Karel. *Měření v elektrotechnice*. 2. přeprac. a dopl. vyd. V Brně: VUT IUM, 2010, 212 s. ISBN 978-80-214-4160-6.

[2] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I*. Praha.: BEN-technická literatura, 1996. ISBN 80-86056-02-3.

[3] TKOTZ, Klaus a Jiří HANDLÍŘ. *Průručka pro elektrotechnika*. Vyd. 1. Praha: Europa-Sobotáles cz., 2002, 561 s. ISBN 80-86706-00-1.

[4] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-49-X.

[5] DE LA ROSA, Francisco C. *Harmonics and power systems*. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2006. ISBN 0-8493-3016-5.

[6] Musil M., Využití Rogowskiho cívky při měření proudu a analýza dosažených parametrů [online].

http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/zaverecne_prace/BP_2007_Musil_Marek_locked.pdf

[7] Ing. Mlčák T., Ph.D., 3. Elektrické obvody střídavého proudu [online].

http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/3_stob_sylab_bc_07.pdf

[8] *Přesnost a chyby měření* [online]. [cit. 2016-04-26]

Dostupné z:

http://home.pf.jcu.cz/~kriz/index.php?option=com_content&view=article&id=226:chybymer&catid=5:5:fpr1&Itemid=27

Seznam příloh

- A.) Katalogový list – DEWE 571 PNA
- B.) Katalogový list – DEWE ORION – 0816 – 100x
- C.) Katalogový list – Hewlett Packard HP model 6834B
- D.) Katalogový list – Wattmetr Yokogawa – WT 210

Disk CD

Bakalářská práce ve formátu PDF

Katalogový list – DEWE 571 PNA

Katalogový list – DEWE Orion – 0816 – 100x

Katalogový list – Hewlett Packard HP model 6834B

Katalogový list – Wattmetr Yokogawa – WT 210

Kompletní tabulky naměřených hodnot

- Mereni_I05_N50_harmonicky_prubeh_linearni_zatez
- Mereni_I1_N50_harmonicky_prubeh_linearni_zatez
- Mereni_I2_N50_harmonicky_prubeh_linearni_zatez
- Mereni_I05_N300_harmonicky_prubeh_linearni_zatez
- Mereni_I1_N300_harmonicky_prubeh_linearni_zatez
- Mereni_I2_N300_harmonicky_prubeh_linearni_zatez
- Mereni_I1_N50_neharmonicky_prubeh_linearni_zatez
- Mereni_I2_N50_neharmonicky_prubeh_linearni_zatez
- Mereni_I1_N300_neharmonicky_prubeh_linearni_zatez
- Mereni_I2_N300_neharmonicky_prubeh_linearni_zatez
- Mereni_I1_N50_harmonicky_prubeh_nelinearni_zatez
- Mereni_I1_N300_harmonicky_prubeh_nelinearni_zatez
- Tabulky_pro_jednotliva_mereni_Word

A.) Katalogový list – DEWE 571 PNA

PNA Instruments

Nothing is required to complete these instruments.




	DEWE-571-PNA / 561-PNA DEWE-571-PNA-1MS / 561-PNA-1MS	DEWE-561-PNA-4U12I DEWE-571-PNA-4U12I	DEWE-561-PNA-4U28I
Dynamic analog input channels	4 voltage 4 current	4 voltage 12 current	4 voltage 28 current
Signal conditioning	Internal		
Current clamps / coils included	4x PNA-FLEX-300-45	-	-
External quasi-static channel expansion	Option PAD-BOX		
Input specifications			
Voltage range	±1400 V peak		
Bandwidth of input amplifiers	DC to 300 kHz		
Direct current input	5 A	-	5 A
Maximum input current via clamps	Depending on clamps		
Maximum input current via flexible coils	10000 A		
A/D conversion			
Sampling rate	571/561-PNA: 250 kS/s aggregate 571/561-PNA-1MS: 1 MS/s/ch	250 kS/s aggregate	1200 kS/s
Resolution	16 bit		
Digital I/O			
Digital I/O, TTL level	2x DIN (24 V max.) and 1x DOUT (Relais, normal open, 60 V / 1 A AC max.)		
Counters	-		
Functions			
Multiple 3 phase systems	✓		
Voltage, current	✓		
Power, frequency, symmetrical components	✓		
Harmonics, interharmonics, THD	✓		
Period values, disturbance rec.	✓		
Fast transient recorder	✓		
Report generator & Flicker	✓		
Network Monitoring	✓		
EN50160	With PMT reporting tool (DEWESOFT-OPT-DB Included)		
Wide band power analysis	Version DEWE-571-PNA-1MS: 1 MS	-	-
EMC			
Power supply	Surge	IEC 61000-4-5: 4 kV	
	Burst	IEC 61000-4-4: 4 kV	
Voltage inputs	Surge	IEC 61000-4-5: 4 kV	
	Burst	IEC 61000-4-4: 4 kV	
Direct current inputs	Surge	IEC 61000-4-5: 4 kV	
	Burst	IEC 61000-4-4: 4 kV	
Shock and vibration			
Shock	EN 60068-2-27		
Vibration	EN 60068-2-6, EN 60721-3-2 class 2M2		
Environmental			
Operating temperature	0 to +50 °C (0 to +45 with batteries)		
Storage temperature	-20 to +70 °C		
Humidity	10 to 80 % non cond., 5 to 95 % rel. humidity		
Data storage ¹⁾			
Technology	Solid State Disk		
Capacity	32 GB		
Main system ¹⁾			
Display	12" TFT (1280 x 800)	12" TFT (1280 x 800)	-
Processor	Intel® Core™2 Duo 2 GHz		
Current transducer power supply 9V	-		
Interfaces	2x USB, 1x Ethernet, 1x RS-232		
Power supply			
Standard	Version 571-PNA: Battery powered, 2 battery slots ²⁾ , 2 batteries for ~2 hrs. operation incl., incl. external AC power supply Version 561-PNA: 95 to 260 V _{AC} 50 / 60Hz		
Optional	-		
Dimensions			
Housing	Portable Instrument		
Dimensions (W x D x H)	360 x 300 x 150 mm (14.2 x 11.8 x 5.9 in.)		
Weight without batteries	Typ. 5 kg (11 lb.)		

¹⁾ Please find current specifications in the latest price list.
²⁾ Weight of one battery: 660 g (1.45 lb.)

¹⁾ Please find current specifications in the latest price list

²⁾ Weight of one battery: 660 g (1.45 lb.)

PNA-FLEX-300-45 / PNA-FLEX-300-45						
	AC input range	0.5 to 300 A		selectable	0.5 to 3000 A	
	Output	10 mV/A			1 mV/A	
	% accuracy	0.5 to 5 A	not specified		0.5 to 5 A	not specified
		5 to 300 A	≤ 1 %		5 to 3000 A	≤ 1 %
	Bandwidth	10 Hz ... 20 kHz				
	Phase shift	0.5 to 5 A	≤ 0.7°		0.5 to 5 A	≤ 0.7°
		5 to 300 A	≤ 0.7°		5 to 3000 A	≤ 0.7°
	Working temperature	-10° to +55°C (maximum temperature for sensor is 90°C)				
	Temperature drift	≤ 0.5 % of output signal per 10K				
	Connector type	C16-1, 6+PE		Length of coil	45 cm for PNA-FLEX-300-45	
Fits to following systems	DEWE-5xx-PNA				80 cm for PNA-FLEX-300-80	
	DEWE-5xx-PNA-1MS					

B.) Katalogový list – DEWE ORION – 0816 – 100x

Analog input	
Channel characteristics	
Number of channels	8 simultaneously sampled
Input configuration	single ended with remote sense
Resolution	16-bit
Effectiv number of bits	14,3
Type of ADC	Successive approximation (SAR)
Sampling rate	1 S/sec to 1 MS/sec per channel
Sampling rate accuracy	50 ppm
Input amplifier characteristics	
Input ranges	$\pm 1.25, \pm 2.5, \pm 5$ or ± 10 V
Analog bandwidth (-3 dB)	600 kHz
Input impedance	10 M Ω parallel (3.9 k Ω + 10 pF)
Overvoltage protection	± 30 V
Common mode rejection ratio (CMRR) of AISense	> 54 dB, $f_n < 1$ kHz
Channel separation (cross talk)	> 90 dB @ f_n 1 kHz
Transfer characteristics	
Gain (amplitude accuracy)	± 0.02 %
Offset (residual DC)	$\pm 0.02\%$ of Range ± 150 μ V
Gain drift (typ)	± 8 ppm/K
Offset drift (typ)	± 5 ppm/K of Range
Dynamic characteristics	
Signal to noise	89 dB
THD ($f_n = 1$ kHz) 0 dB $_{FS}$ input	< -90 dB
THD ($f_n = 1$ kHz) -20 dB $_{FS}$ input	< -93 dB
Interchannel gain mismatch	± 0.015 %
Inter channel phase mismatch ($f_n < 500$ kHz)	$0.006^\circ \cdot f_n$ (kHz) $\pm 0.08^\circ$
Maximum working voltage	
Channel-to-ground	10 V, installation category I
Channel-to-channel	10 V, installation category I

Digital and Counter input	
Counter resolution	32-bit
Counter time base	80 MHz
Time base accuracy	25 ppm
Maximum input frequency	40 MHz
Input signal characteristic main board	
Compatibility	TTL/CMOS
Configuration	Pull-up with 100 kOhm
Input low level	-0.7 V to 0.8 V
Input high level	2 V to 5 V
Input low current	< -50 μ A
Input high current	< 10 μ A
Input capacitance	< 5 pF
Overvoltage protection (DI 0 to DI 15)	-1 to 6 V
Input signal characteristic CLK and Trigger	
Compatibility	TTL Schmitt trigger
Configuration	Pull-up with 100 kOhm
Input low level	-0.7 V to 2 V
Input high level	3 V to 5 V
Input low current	< -50 μ A
Input high current	< 10 μ A
Input capacitance	< 5 pF
Overvoltage protection	-1 to 6 V
Input signal characteristic expansion board with TTL input (DEWE-ORION-0816-1002/1003)	
Compatibility	TTL/CMOS
Configuration	Pull-up with 100 kOhm
Input low level	-0.7 V to 0.8 V
Input high level	2 V to 5 V
Input low current	< -50 μ A
Input high current	< 10 μ A
Input capacitance	< 5 pF
Overvoltage protection	± 25 V continuous
Input signal characteristic expansion board with adjustable input (DEWE-ORION-0816-1004/1005)	
Compatibility	Adjustable trigger levels
Configuration	Symmetric differential
Input coupling	DC / AC (1Hz)
Input impedance (ground referenced)	1 MOhm / 5 pF
Bandwidth (-3dB)	5 MHz
Trigger adjustment range	0 to 40 V
Trigger resolution	40 mV
Trigger level accuracy	± 100 mV $\pm 1\%$ of trigger level
Common voltage range	-35 to 50V
Common mode rejection ratio	>40 dB
Overvoltage protection	± 100 V continuous
Max. DC level @AC coupling	± 50 V continuous
Input signal characteristic with isolated inputs	
Compatibility	CMOS
Configuration	Isolated input
Input low level	$U_{IN} < 1.8$ V
Input high level	$U_{IN} > 3.2$ V
Input high current @ 5 V U_{IN}	< 3.5 mA
Input high current @ 30 V U_{IN}	< 7 mA
Propagation delay	< 160 nsec
Bandwidth	3 MHz
Overvoltage protection	35 V continuous (65 V peak)
Isolation voltage (channel to channel)	100 V
Isolation voltage (input to output)	250 V

C.) Katalogový list - Hewlett Packard HP model 6834B

44

AGILENT ac POWER SOLUTIONS

ac Power Solutions (cont'd)

SPECIFICATIONS

(per phase for a sine wave with a resistive load at 0° to 40° C, within an output frequency range of 45 Hz to 1000Hz, and in ac coupled mode after a 30 minute warm-up unless otherwise noted. Note: For 6814B, 6834B and 6843A output voltage must be at least 50% of range.)

		6811B	6812B	6813B	6814B	6834B	6843A
Number of phases		1	1	1	1	1/3	1
Output ratings (Maximum)	Power	375 VA	750 VA	1750 VA	3000 VA	4500 VA/1500 VA	4800 VA
	rms voltage	300 V	300 V	300 V	300 V (high range) 150 V (low range)	300 V (high range) 150 V (low range)	300 V (high range) 150 V (low range)
	rms current	3.25 A	6.5 A	13 A	² 10 A (300 V range) ² 20 A (150 V range)	² 15 A/5 A (300 V range) ² 30 A/10 A (150 V range)	16A (300 V range) 32A (150 V range)
	Repetitive & non-repetitive peak current	40 A	40 A	80 A	40 A (300 V range) 80 A (150 V range)	60 A/20A (300 V range) 120 A/40 A (150 V range)	48 A (300 V range) 96 A (150 V range)
	Crest factor	12	6	6	4	4	3
	Load Power factor capability	0 to 1	0 to 1	0 to 1	0 to 1	0 to 1	0 to 1
	dc power	285 W	575 W	1350 W	N/A	N/A	N/A
	dc voltage	±425 V	±425 V	±425 V	N/A	N/A	N/A
	dc current	2.5 A	5.0 A	10.0 A	N/A	N/A	N/A
Output frequency range		dc; 45Hz to 1 kHz	dc; 45Hz to 1 kHz	dc; 45 Hz to 1 kHz	45Hz to 5 kHz	45 Hz to 5 kHz	45 Hz to 1 kHz
Constant voltage ripple and noise	(20 kHz to 10 MHz)	-60 dB (relative to full scale)	-60 dB (relative to full scale)	-60 dB (relative to full scale)	-60 dB (relative to full scale)	-60 dB (relative to full scale)	-60 dB (relative to full scale)
Line regulation	(% of full scale)	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Load regulation	(% of full scale)	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%
Maximum total harmonic distortion		0.25% at 50/60Hz 1% worst case 45 to 1 kHz	0.25% at 50/60Hz 1% worst case 45 to 1 kHz	0.25% at 50/60Hz 1% worst case 45 to 1 kHz	1% (45-1000Hz) 1% + 1%/kHz (>1 kHz - 5 kHz)	1% (45-1000Hz) 1% + 1%/kHz (>1 kHz - 5 kHz)	1% (45-1000 Hz) 1% + 1%/kHz (>1 kHz - 5 kHz)

SPECIFICATIONS (CONTINUED)

(per phase for a sine wave with a resistive load at 0° to 40° C, within an output frequency range of 45 Hz to 1000Hz, and in ac coupled mode after a 30 minute warm-up unless otherwise noted. Note: For 6814B, 6834B and 6843A output voltage must be at least 50% of range.)

		6811B	6812B	6813B	6814B	6834B	6843A
Programming accuracy (25° ± 5° C)							
Number of Phases		1	1	1	1	1/3	1
RMS Voltage (% of output + offset)	0.15% + 0.3 V (45 - 100Hz)	0.15% + 0.3 V (45 - 100Hz)	0.15% + 0.3 V (45 - 100Hz)	0.15% + 0.3 V (45 - 100Hz)	0.15% + 0.3 V (45 - 100Hz)	0.15% + 0.3 V (45 - 100Hz)	0.15% + 0.3 V (45 - 100Hz)
	0.5% + 0.3 V (>100 - 500 Hz)	0.5% + 0.3 V (>100 - 500 Hz)	0.5% + 0.3 V (>100 - 500 Hz)	0.5% + 0.3 V (>100 - 500 Hz)	0.5% + 0.3 V (>100 - 500 Hz)	0.5% + 0.3 V (>100 - 500 Hz)	0.5% + 0.3 V (>100 - 500 Hz)
	1% + 0.3 V (> 500 - 1000 Hz)	1% + 0.3 V (> 500 - 1000 Hz)	1% + 0.3 V (> 500 - 1000 Hz)	1% + 0.3 V (> 500 - 1000 Hz)	1% + 0.3 V (> 500 - 5000 Hz)	1% + 0.3 V (> 500 - 5000 Hz)	1% + 0.3 V (> 500 - 1000 Hz)
DC voltage	0.1% + 0.5 V	0.1% + 0.5 V	0.5% + 0.3 V	N/A	N/A	N/A	N/A
Frequency	0.01% + 10μHz	0.01% + 10μHz	0.01% + 10μHz	0.01% + 10μHz	0.01% + 10μHz	0.01% + 10μHz	0.01% + 10μHz
3 Phase Mode (6834B only)	N/A	N/A	N/A	N/A	0.1° (45 - 100 Hz) 1° (>100 - 1kHz) 1° + 1°/kHz (>1 kHz - 5kHz)		N/A

AGILENT ac POWER SOLUTIONS

ac Power Solutions (cont'd)

(per phase for a sine wave with a resistive load at 0° to 40° C, within an output frequency range of 45 Hz to 1000 Hz, and in ac coupled mode after a 30 minute warm-up unless otherwise noted. Note: For 6814B, 6834B and 6843A output voltage must be at least 50% of range.)¹

SPECIFICATIONS (CONTINUED)

	6811B	6812B	6813B	6814B	6834B	6843A
Measurement accuracy (25° ± 5° C)						
Rms. voltage (45 - 100 Hz)	0.03% + 100 mV ³	0.03% + 100 mV ³	0.03% + 100 mV ³	0.05% + 250 mV	0.05% + 250 mV	0.05% + 250 mV
dc Voltage	0.05% + 150 mV ²	0.05% + 150 mV ³	0.05% + 150 mV ³	N/A	N/A	N/A
RMS Current (45 - 100 Hz)⁴						
high range	0.05% + 10 mA	0.05% + 10 mA	0.05% + 10 mA	0.1% + 50 mA	0.1% + 50 mA (1Φ) 0.1% + 25 mA (3Φ)	0.1% + 50 mA
low range	0.05% + 1.5 mA	0.05% + 1.5 mA	0.05% + 1.5 mA	N/A	N/A	N/A
Power (VA) (45-100 Hz)⁴						
high range	0.1% + 1.5 VA + 12 mVA/V	0.1% + 1.5 VA + 12 mVA/V	0.1% + 1.5 VA + 12 mVA/V	0.15% + 5 VA	0.15% + 5 VA (1Φ) 0.15% + 3 VA (3Φ)	0.15% + 9 VA
low range	0.1% + 1.5 VA +1.2 mVA/V	0.1% + 1.5 VA +1.2 mVA/V	0.1% + 1.5 VA +1.2 mVA/V	N/A	N/A	N/A
Power (watts) (45-100 Hz)⁴						
high range	0.1% + 0.3 W + 12 mW/V	0.1% + 0.3 W + 12 mW/V	0.1% + 0.3 W + 12 mW/V	0.15% + 5 W	0.15% + 5 W (1Φ) 0.15% + 3 W (3Φ)	0.15% + 9 W
low range	0.1% + 0.3 W + +1.2 mW/V	0.1% + 0.3 W + +1.2 mW/V	0.1% + 0.3 W + +1.2 mW/V	N/A	N/A	N/A
Frequency	0.01% + 0.01 Hz	0.01% + 0.01 Hz	0.01% + 0.01 Hz	0.01% + 0.01 Hz	0.01% + 0.01 Hz	0.01% + 0.01 Hz
Power Factor	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Regulatory Test Solutions IEC mode measurement system characteristics (6812B, 6813B and 6843A only)						
Output frequency range	N/A	50 /60 Hz	50 /60 Hz	N/A	N/A	50 /60 Hz
Reference impedance accuracy	N/A	3% (at 0.4 Ω and 796 mH) 1% (at 0.4 Ω and 796 mH at 25°)	3% (at 0.4 Ω and 796 mH) 1% (at 0.4 Ω and 796 mH at 25°)	N/A	N/A	3% (at 0.4 Ω and 796 mH) 1% (at 0.4 Ω and 796 mH at 25°)
Output voltage harmonic content⁶	N/A	Compliant with IEC 868 and IEC 61000-3-2	Compliant with IEC 868 and IEC 61000-3-2	N/A	N/A	Compliant with IEC 868 and IEC 61000-3-2
Measurement accuracy						
Current magnitude (low range)	Fundamental Harmonics 2-49	0.03% + 1.5 mA 0.03% + 1mA + 0.2%/kHz	0.03% + 1.5 mA 0.03% + 1mA + 0.2%/kHz	N/A	N/A	0.03% + 3 mA 0.03% + 2 mA + 0.2%/kHz
Current magnitude (high range)	Fundamental Harmonics 2-49	0.05% + 5 mA 0.05% + 3 mA + 0.2%/kHz	0.05% + 5 mA 0.05% + 3 mA + 0.2%/kHz	N/A	N/A	0.05% + 6 mA 0.05% + 3 mA + 0.2%/kHz
Flicker	N/A	Compliant with IEC 868	Compliant with IEC 868	N/A	N/A	Compliant with IEC 868
Flicker Perceptibility (PST)	N/A	Compliant with IEC 868	Compliant with IEC 868	N/A	N/A	Compliant with IEC 868
Synchronization accuracy	N/A	<1ppm	<1ppm	N/A	N/A	<1ppm
Current shunt burden	N/A	0 volts	0 volts	N/A	N/A	0 volts
Current harmonic smoothing filter time constant	N/A	1.5 seconds	1.5 seconds	N/A	N/A	1.5 seconds
Pst integration time	N/A	1, 5, 10 or 15 minutes	1, 5, 10 or 15 minutes	N/A	N/A	1, 5, 10 or 15 minutes

D.) Katalogový list – Wattmetr Yokogawa – WT210

Specifications

The latest product information is available at our web site <http://www.yokogawa.com/tm/>. Review the specifications to determine which model is right for you.

Input Specifications		
Parameter	Voltage	Current
Input type	Floating input	
	Resistance voltage divider	Shunt input system
Rated values (ranges)	15/30/60/150/300/600 V	Direct input: 5/10/20/50/100/200 mA (WT210 only) ¹ ; 0.5/1/2/5/10/20 A (WT210/WT230) External input (optional): 2.5/5/10 V or 50/100/200 mV
Measuring instrument loss (input resistance)	Input resistance: Approximately 2 M Ω Input capacitance: Approximately 13 pF	Direct input: Approximately 500 m Ω + approximately 0.1 μ H (5-200 mA; WT210) Approximately 6 m Ω + 10 m Ω (max) ² + approximately 0.1 μ H (0.5-20 A; WT210) Approximately 6 m Ω + approximately 0.1 μ H (0.5-20 A; WT230) External input: Approximately 100 k Ω (2.5/5/10 V), approximately 20 k Ω (50/100/200 mV)
Maximum instantaneous allowed input (1 cycle, 20 ms duration)	Peak voltage of 2.8 kV or rms value of 2.0 kV (whichever is less)	0.5-20 A (WT210/WT230): Peak current of 450 A or rms value of 300 A (whichever is less) 5-200 mA (WT210): Peak current of 150 A or rms value of 100 A (whichever is less) External input: Peak value of 10 times range or less
Maximum instantaneous allowed input (1 second duration)	Peak voltage of 2.0 kV or rms value of 1.5 kV (whichever is less)	0.5-20 A (WT210/WT230): Peak current of 150 A or rms value of 40 A (whichever is less) 5-200 mA (WT210): Peak current of 30 A or rms value of 20 A (whichever is less) External input: Peak value of 10 times range or less
Maximum continuous allowed input	Peak voltage of 1.5 kV or rms value of 1.0 kV (whichever is less)	0.5-20 A (WT210/WT230): Peak current of 100 A or rms value of 30 A (whichever is less) 5-200 mA (WT210): Peak current of 30 A or rms value of 20 A (whichever is less) External input: Peak value of 5 times range or less
Maximum continuous common mode voltage (with 50/60 Hz input)	600 Vrms (with output connector protective cover), CAT II / 400 Vrms (without output connector protective cover) CAT II	
CMRR 600 Vrms across input terminal and case	50/60 Hz, -80 dB or higher ($\pm 0.01\%$ of range or less) with voltage input terminals shorted and current input terminals open and external input terminals shorted Reference value (up to 100 kHz): $\pm((\text{Maximum range rating})/(\text{Range rating}) \times 0.001 \times \% \text{ of rng})$ or less (voltage range and 0.5-20 A current range and external input range) ³ $\pm((\text{Maximum range rating})/(\text{Range rating}) \times 0.0002 \times \% \text{ of rng})$ or less (WT210; 5-200 mA range) Note: 0.01% or higher, f is in kHz. 3 Decouple the above-formula about the external input range.	
Input terminal type	Plug-in terminal (safety terminal)	Direct input: Large binding post External input: BNC connector (insulation type)
A/D converter	Simultaneous conversion of voltage and current inputs Resolution: 16 bits Maximum conversion speed: Approximately 20 μ s (approximately 51 kHz)	
Range switching	Ranges can be set manually, automatically, or through online controls. Auto-range function Range raising: When a measurement exceeds 130% of the rating, or when the peak value exceeds approximately 300% of the rating Range lowering: When a measurement falls to 30% or less of the rating, and the peak value falls to approximately 300% or less of the rating for the low range	
Measurement mode switching	Any of the following, selected manually or through online controls: RMS (true rms value measurements for both voltage and current), V MEAN (calibration of average-value-rectified rms value for voltage; true rms value measurement for current), DC (simple averages for both voltage and current)	

Note: Current direct input and external sensor input cannot both be used at the same time. When you operate current input terminals and external input terminals, please be careful.

Since these terminals are electrically connected inside the instrument.

1, Connect wires that match the size of the measurement current.

2, Factory setting

Measurement Functions																					
Parameter		Voltage/current			Active power																
System		Digital sampling: sum of averages method																			
Frequency range		DC, and 0.5 Hz to 100 kHz																			
Crest factor		3 (with rated input) 300 (with minimum effective input)																			
Accuracy (three months after calibration) (Conditions) Temperature: 23±5°C Humidity: 30-75% RH Input waveform: Sinewave Power factor: cosφ = 1 In-phase voltage: 0 V DC Frequency filter: ON at 200 Hz or less Scaling: OFF Display digits: 5 digits After CAL is executed		DC: ±(0.2% of rdg + 0.2% of rng)* 0.5 Hz ≤ f < 45 Hz: ±(0.1% of rdg + 0.2% of rng) 45 Hz ≤ f ≤ 66 Hz: ±(0.1% of rdg + 0.1% of rng) 66 Hz < f ≤ 1 kHz: ±(0.1% of rdg + 0.2% of rng) 1 kHz < f ≤ 10 kHz: ±((0.07 × f) of rdg + 0.3% of rng) 10 kHz < f ≤ 100 kHz: ±((0.5% of rdg + 0.5% of rng) ±((0.04 × (f-10))% of rdg)			DC: ±(0.3% of rdg + 0.2% of rng)* 0.5 Hz ≤ f < 45 Hz: ±(0.3% of rdg + 0.2% of rng) 45 Hz ≤ f ≤ 66 Hz: ±(0.1% of rdg + 0.1% of rng) 66 Hz < f ≤ 1 kHz: ±(0.2% of rdg + 0.2% of rng) 1 kHz < f ≤ 10 kHz: ±(0.1% of rdg + 0.3% of rng) ±((0.067 × (f-1))% of rdg) 10 kHz < f ≤ 100 kHz: ±(0.5% of rdg + 0.5% of rng) ±((0.09 × (f-10))% of rdg)																
Note: In the accuracy calculation formula, f is in kHz.		* Add ±10 μA to the current DC accuracy.			* Add ±10 μA × voltage reading to the power DC accuracy.																
Power factor effect					For cosφ = 0 45 Hz ≤ f ≤ 66 Hz: ±0.2% of VA (VA is a reading value of apparent power) Reference data (up to 100 kHz): ±((0.2 + 0.2 × f) of VA) Indicated value tolerance for 0 < cosφ < 1 Add (tanφ × (effect when cosφ = 0) of power reading to the above power accuracy. Note: φ is the phase angle between voltage and current.																
Note: In the accuracy calculation formula, f is in kHz.																					
Effective input range		1-130% of voltage/current range rating (for accuracy at 110-130%, add the reading tolerance × 0.5 to the above accuracy)																			
Accuracy (12 months after calibration)		Add the accuracy's reading tolerance (three months after calibration) × 0.5 to the accuracy three months after calibration.																			
Line filter function		A low-pass filter can be inserted in the input circuit for measurement. The cutoff frequency (fc) is 500 Hz.																			
Accuracy with line filter on		Voltage and current: Add 0.2% of rdg at 45-66 Hz. Add 0.5% of rdg below 45 Hz. Power: Add 0.3% of rdg at 45-66 Hz. Add 1% of rdg below 45 Hz.																			
Temperature coefficient		±0.03% of range/°C at 5-18°C and 28-40°C.																			
Display updating intervals		0.1/0.25/0.5/1/2/5 seconds																			
Lead/lag detecting		Lead/lag is detected correctly when phase difference equal to or greater than ±5° with both voltage and current inputs as sine waves equal to or greater than 50% of rated range-value, and the frequency is between 20 Hz to 2 kHz.																			
Measurement lower limit frequency		<table><tr><td>Data updating rate</td><td>0.1 second</td><td>0.25 second</td><td>0.5 second</td><td>1 second</td><td>2 seconds</td><td>5 seconds</td></tr><tr><td>Measurement lower limit frequency</td><td>25 Hz</td><td>10 Hz</td><td>5 Hz</td><td>2.5 Hz</td><td>1.5 Hz</td><td>0.5 Hz</td></tr></table>						Data updating rate	0.1 second	0.25 second	0.5 second	1 second	2 seconds	5 seconds	Measurement lower limit frequency	25 Hz	10 Hz	5 Hz	2.5 Hz	1.5 Hz	0.5 Hz
Data updating rate	0.1 second	0.25 second	0.5 second	1 second	2 seconds	5 seconds															
Measurement lower limit frequency	25 Hz	10 Hz	5 Hz	2.5 Hz	1.5 Hz	0.5 Hz															

rng: Range rdg: Reading

rng: Range rdg: Reading